インペラ機構の揚魚性能に関する研究

陳 涇, 矢田 貞美

(1995年8月1日受付)

Studies on Efficiency of Spiral Impeller Mechanism for Pumping up Fry

Hu Chen^{*1} and Sadami Yada^{*1}

This paper discusses the efficiency of a spiral impeller mechanism, the influence of the angle of inclination of the casing, the peripheral velocity of the spiral impeller, and inner diameter of the casing for pumping up fry. It also describes the relationship between the quantity water pumped up and the clearance between the spiral impeller and inside wall of the casing.

When the clearance between the spiral impeller and inside wall of the casing was less than 1.5 mm, the peripheral velocity of the spiral impeller was from 0.74 m/s to 1.88 m/s and the inclination of the casing was less than 50°, the spiral impeller mechanism could pump up fry. The quantity of water pumped up was not affected by a clearance of less than 1.5 mm between the spiral impeller and inside wall of the casing. When the volume ratio of fry and water in the fish tank was 0.30, the radius of the casing 0.25 m, inclination of the casing 42°, and peripheral velocity of the spiral impeller 1.88 m/s, the spiral impeller mechanism could pump up 2,490 thousand fry per hour.

キーワード：ポンプ，魚数，計数，揚魚量，スパイラルインペラ

光センサ式魚数計の計数精度は、実数より48.6%不足から17.2%過多の範囲にあり、計数誤差が大きい。^{1,2)} 著者らは、計数誤差の主因となる幼魚の重複防止方法、気泡に基因する誤差の回避方法などの開発により、²⁾ 連続計数システムを確立した。^{*2} しかし、種苗幼魚の計数精度は高いが、単尾ずつ吸引計数する方式なので計数能率が低いため、実用面から性能向上が望まれる。^{3,4)}

一方、従来の渦巻ポンプブレードレス型は移送能力は高い。しかし、ブレードによる高速回転に基づく遠心力、急激な水圧変動、幼魚と水の体積比（以降、魚水比と称する）の調整の困難性、並びにポンプ機構に基因する流れの不円滑性などにより、魚体の相互接触による表皮の損傷が発生しやすく、また生理的な刺激が大きい。^{*3} それ故、その後の生育に対して悪影響が危惧される。

本報では、以上の問題に着目し、高性能な魚数計の計数部に幼魚を移送する高性能な手段として、ねじコンベヤ機構を応用したスパイラルインペラ（以降、インペラ

と称する）機構による揚魚システムを試作・供試した。⁵⁾ ケーシングの傾斜角、インペラ先端の周速度およびケーシング内径と揚魚性能の関係、並びにインペラとケーシング内壁のクリアランスの多少と揚水量の関係などについて検討した。

実験装置および実験方法

実験装置 Fig. 1 にインペラ機構による揚魚システムを示す。本揚魚システムは長さ1.2 m×内径0.144 mのケーシングと、全長1.044 m×ピッチ0.116 m×9ピッチのインペラにより構成される。インペラは軸径が0.042 mで、外径が0.141 m, 0.142 mおよび0.143 mのものを供試した。すなわち、インペラとケーシング内壁のクリアランスを、おのおの1.5 mm, 1.0 mmおよび0.5 mmとした。揚魚状況を観察するため、ケーシングは透明な材質（ポリカーボネート）を、またインペラは軽量の材質（ナイロン）を使用した。インペラ先端の周速度はモータ（定格出力3.5 kW, 定格回転数1,440 rpm）の周波数をインバータにより調整して制御した。

^{*1} 東京水産大学海洋生産学科漁業工学講座 (Laboratory of Fishing Technology and Engineering, Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

^{*2} 陳 涇, 矢田貞美, 戸田勝善: 幼魚の連続計数システムに関する研究. la mer 投稿中.

^{*3} 陳 涇: 稚活魚の計数システムに関する研究. 修士論文, 東京水産大学, 東京, 1992, p. 1.

Fig. 1. Spiral impeller mechanism for pumping up fry.

本インペラ機構の排出端のケーシング壁に縦0.12 m×横0.12 mの下向き排出口（以降、吐出口と称する）を設け、同吐出口に魚受網を設けた。水槽内の取込口から幼魚（コイ、全長80 mmから110 mmまで）の遊泳逃避を防止するため、取込口から0.15 mの距離に遮断網（縦0.15 m×横0.15 m×高さ0.3 m）を設けた。以降、取込口から本遮断網までの水域（水深0.15 m×縦0.15 m×横0.15 m）を揚魚水域と称する。

実験方法 ケーシングの傾斜角及びインペラ先端の周速度と揚魚性能の関係について検討するため、ケーシングの傾斜角を90°に、またインペラ下端のピッチの2分の1が水中に浸漬するように設置した。水槽内の幼魚と水（以降、魚水と称する）は、前記インバータ制御のモータによりインペラ機構を回転させ、同機構の下端の取込口から取込み、同機構の上端の吐出口から排出される。

本実験では、インペラの回転を零から500 rpmまでは50 rpm間隔で、また500 rpmから700 rpmまでは100 rpm間隔に設定し、揚魚水域に複数尾を放流した。ケーシングの傾斜角35°、42°、50°および60°における幼魚の取込口から吐出口までの所用移送時間（以降、揚魚時間と称する）を計測した。また、撮影ビデオ画像により取込口およびケーシング内における揚魚状況を解析し、また倍率20倍の拡大鏡により魚体損傷の有無について調査した。

次に、インペラ先端の周速度と揚水量について検討するため、前項で明らかにしたインペラ先端の周速度、インペラとケーシング内壁のクリアランス、並びにケーシングの傾斜角度による揚水量の関係などについて検討した。

結果および考察

ケーシング内の微小な水ブロックが受ける力 Fig. 2

にケーシング内の微小な水ブロックが受ける力を示す。Fig. 2aに示すように、微小な水ブロックの重力を G 、 G の回転軸に垂直な分力を $G \cdot \cos \theta$ 、 G の回転軸方向の分力を $G \cdot \sin \theta$ とする。Fig. 2bに示すように、 $G \cdot \cos \theta$ のケーシング内壁の接線方向の分力を $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ 、 $G \cdot \cos \theta$ のケーシング内壁の法線方向の分力を $G \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha$ とする。Fig. 2cに示すように、 $G \cdot \sin \theta$ のインペラ面に平行な分力を $G \cdot \sin \theta \cdot \sin \beta$ 、 $G \cdot \sin \theta$ のインペラ面に垂直な分力を $G \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta$ 、 $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ のインペラ面に垂直な分力を $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ 、 $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ のインペラ面に平行な分力を $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ とする。

微小な水ブロックがケーシング内壁から受ける力を $N_1(N)$ 、インペラ面から受ける力を $N_2(N)$ 、揚水方向の同ブロックとケーシング内壁の摩擦力を $f_1(N)$ 、インペラ面の摩擦力を $f_2(N)$ 、回転軸方向の同ブロックとケーシング内壁の摩擦力を $f_3(N)$ とすると、おのおの式(1)、同(2)および同(3)で示される。

$$N_1 = m \frac{V_{pe}^2}{r} + G \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$N_2 = G \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta + G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + f_3 \cdot \cos \beta \quad (2)$$

$$f_1 = \mu_1 \cdot N_1, \quad f_2 = \mu_2 \cdot N_2, \quad f_3 = f_1, \quad n = \frac{V_{pe}}{2\pi r} \quad (3)$$

ただし、ケーシングの傾斜角を $\theta(^{\circ})$ 、インペラの螺旋角を $\beta(^{\circ})$ 、ケーシングの回転軸方向の横断面における微小な水ブロックと垂直方向の挟角（以降、変位角と称する）を $\alpha(^{\circ})$ 、インペラの回転数を n 、水とケーシング内壁およびインペラ面の摩擦係数を μ_1 および μ_2 、半径 $r(m)$ のインペラ先端の周速度を $V_{pe}(m/s)$ とする。

式(3)より、本機構のインペラの回転数が100 rpm、150 rpm、200 rpm、250 rpm、300 rpmおよび350 rpmの

Fig. 2. Resistance to micro water block in the casing.

G : micro water block's gravitation, $G \cdot \cos \theta$: perpendicular component of G relative to the rotating shaft, $G \cdot \sin \theta$: component of G in direction of the revolution, $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$: tangential component of $G \cdot \cos \theta$ along inside wall of the casing, $G \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha$: normal component of $G \cdot \cos \theta$ along inside wall of the casing, $G \cdot \sin \theta \cdot \sin \beta$: component of $G \cdot \sin \theta$ parallel to the spiral impeller, $G \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta$: perpendicular component of $G \cdot \sin \theta$ to the spiral impeller, $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$: component of $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ parallel to the spiral impeller, $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$: perpendicular component of $G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ relative to the spiral impeller, N_1 : pressure of micro water block acting from the inside wall of the casing, N_2 : pressure of micro water block acting from the spiral impeller, f_1 : friction between micro water block and inside wall of the casing in direction of pumpin gup fry, f_2 : friction between micro water block and spiral impeller surface in direction of pumping up fry, f_3 : friction between micro water block and inside wall of the casing in direction of the rotating shaft, θ : inclination angle of the casing, α : displacement angle of micro water block, β : spiral angle.

場合, インペラ先端の周速度は, おおの 0.75 m/s, 1.13 m/s, 1.51 m/s, 1.88 m/s, 2.26 m/s および 2.46 m/s となる。

また, インペラ面に沿って揚水される微小な水ブロックが受ける力 $F(N)$ は式(4)で示される。

$$F = f_1 + G \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta - G \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta - f_3 \cdot \sin \beta - f_2 \quad (4)$$

微小な水ブロックが定速で揚水される場合, 式(4)の F は零になるので, インペラ先端の周速度 V_{pe} は式(5)で示される。

$$V_{pe} = \frac{(\sin \theta + \mu_1 \cos \theta \cos \alpha)(\sin \beta + \mu_2 \cos \beta) + \cos \theta \sin \alpha (\mu_2 \sin \beta - \cos \beta) - \mu_1 \cos \theta \cos \alpha}{\mu_1 \cdot (1 - \sin \beta - \mu_2 \cos \beta)} \cdot g r \quad (5)$$

ここで, 水とケーシング内壁及びインペラ面の摩擦係

数 μ_1 および μ_2 の推定値をそれぞれ 0.1, 変位角 α を 180° , インペラの螺旋角 β を 14.4° , 同半径 r を 0.072 m の, おおの実測値を式(5)代入してケーシング内の微小な水ブロックを回転させるインペラの最低周速度 V_{pe} を求めると, ケーシングの傾斜角 35° で 1.65 m/s, 同 42° では 1.74 m/s となり, 本実験値の傾斜角 35° における 1.51 m/s, 同傾斜角 42° における 1.88 m/s とほぼ一致する。

また, 式(5)より, 揚魚可能な螺旋角 β の範囲は 78.6° 以下と推定される。

魚体がケーシング内壁から受ける力 微小な水ブロックと同様に, ケーシング内壁に沿って回転する魚体がケーシング内壁から受ける力は式(1)の N_1 で示される。魚体とケーシング内壁およびインペラ面の摩擦係数 μ_{f1} , μ_{f2} の推定値をそれぞれ 0.1, また魚体の質量 m_f を 8 g/尾, インペラ半径 r を 0.072 m, 同螺旋角 β を 14.4° ,

ケーシングの傾斜角 θ を 42° 、変位角 α を 0° の各実測値を式(1)および同(3)に代入して、魚体がケーシング内壁から受ける力を試算する。インペラ先端の周速度が 1.88 m/s 、 2.26 m/s および 2.64 m/s の場合、魚体がケーシング内壁から受ける力は、おのおの 0.45 N 、 0.62 N および 0.83 N となる。魚体がケーシング内壁に沿って回転しない周速度 1.88 m/s 以下では、ケーシング内壁から 0.055 N の力を受けることになる。

揚魚は、周速度が 0.38 m/s 以上ではほぼ可能であるが、 0.75 m/s 以上ではスムーズであった。周速度 0.75 m/s から 1.13 m/s では、頭部から取込まれると、インペラ面に沿ってピッチ分が揚魚されたが、尾部から取込まれると、逆に魚体がピッチ分降下する現象が認められた。しかし、揚魚速度は実測値と理論値がほぼ一致した。Fig. 3 にケーシングの傾斜角 35° および 42° におけるインペラ先端の周速度と揚魚速度の関係を示す。周速度が 1.51 m/s 以上になると、インペラ面に沿って魚体が揚魚されたり、降下する現象は認められなかった。しかし、水中に浸漬するピッチ内の魚体がケーシング内壁に沿って1回転して取込まれるため、揚魚速度は実測値が理論値より遅かった。また、周速度 1.88 m/s では、魚体はケーシング内壁に 0.45 N の力で押付けられるので、揚魚速度は周速度 1.51 m/s 時よりさらにほぼ 0.05 m/s 減速し、 0.3 m/s であった。

周速度 2.26 m/s では、魚体はケーシング内壁に 0.62 N の力で押付けられるので、恰もケーシング内壁に沿って回転し、またインペラ面で停止しているように観察され、水槽内の水面より3ピッチ以内の魚体は揚魚されなかった。この状態で約1分間運転し、魚体の損傷を観察したところ、脱鱗および出血などは認められな

かったので、魚体は 0.62 N の押付けられる力に耐えられたものと考えられる。

ケーシング内壁に押付けられる力が 0.83 N 以上になると周速度 2.64 m/s から 3.39 m/s では脱鱗しなかったが、ケーシング内壁から押される力により約20%の幼魚は鱗間から出血した。

周速度が 3.39 m/s 以上になると、脱鱗および出血などの魚体の損傷が発生した。特に、周速度 3.77 m/s では、回転インペラ先端と衝突するためと推察される損傷が揚魚数の約40%生じた。

また、ケーシングの傾斜角が 50° 以上になると、周速度 1.88 m/s 以下では、揚魚は可能であったが、魚体がインペラ面に沿って降下したり、停止しているように観察され、揚魚されない現象が度々認められた。

故に、本機構では、魚体の損傷防止の観点から、周速度を 0.75 m/s から 1.88 m/s の範囲に、また同ケーシングの傾斜角を 50° 以下に設定する必要がある。

魚体がインペラ先端から受ける力 幼魚の体側がインペラ先端と接触する場合、胴体の湾曲程度は個体により異なる。胴体が湾曲しないで体側がインペラ先端と接触する場合、魚体のインペラ回転の逆方向の流体抵抗は最大となるため、魚体がインペラから受ける接触力も最大となる。また、幼魚は水流により、尾鰭を湾曲して水流と逆方向になろうとするので、尾鰭による流体抵抗はほぼ零となると推定されるから無視すると、次項が成立する。頭部先端から体高までの体側の形状を楕円弧と見なし、その面積を楕円の2分の1、体高から尾部までの体側の形状を台形とすると、体側面積 $A(\text{m}^2)$ は式(6)で示される。

$$A = \frac{1}{2} (\pi L_1 H_0 + (L_0 - L_1) \cdot (H_0 + H_1)) \quad (6)$$

ただし、体長を $L_0(\text{m})$ 、体高を $H_0(\text{m})$ 、頭部先端から体高までの長さ（以降、頭部長と称する）を $L_1(\text{m})$ 、尾部の高さを $H_1(\text{m})$ とする。魚体がインペラ先端と接触し、インペラと共に回転する場合、同魚体の流体抵抗 $D_f(\text{N})$ は式(7)で示される。⁶⁾

$$D_f = \frac{\rho}{2} V_{pe}^2 A C_D \quad (7)$$

ただし、インペラ先端の周速度を $V_{pe}(\text{m/s})$ 、水の密度を $\rho(10^3 \text{ kgf/m}^3)$ 、流体抵抗係数を C_D とする。

また、体長2分の1のところの体高がインペラ先端と接触する際、胴体高を $H_2(\text{m})$ 、インペラ先端の厚さを $d(\text{m})$ とすると、魚体がインペラ先端から受ける接触力は同魚体の流体抵抗と釣り合うため、インペラ先端と接触する魚体の単位面積当たりの圧力 $P_f(\text{kPa})$ は式(8)で示される。

Fig. 3. Relationship between the peripheral velocity of the spiral impeller and the velocity of pumping up fry.

θ : inclination angle of the casing, r : radius of spiral impeller.

$$P_f = \frac{10^{-3} D_f}{H_2 d} \quad (8)$$

式(6), 同(7)および同(8)より, 魚体の単位面積当たりの圧力 P_f (kPa) とインペラ先端の周速度 V_{pe} (m/s) との関係は式(9)で示される。

$$P_f = \frac{10^{-3} \cdot \rho C_D [\pi L_1 H_0 + (L_0 - L_1)(H_0 + H_1)]}{4 H_2 d} \cdot V_{pe}^2 \quad (9)$$

式(9)より, 損傷防止の観点から, 魚体の単位面積当たりの圧力を減少するには, インペラ先端は厚い円弧にする必要がある。インペラ先端の周速度 V_{pe} を 1.88 m/s, インペラ先端の厚さ d を 0.004 m, インペラノ半径 r を 0.072 m, 魚体の流体抵抗係数 C_D を 1.7,⁷⁾ 体長 L_0 を 0.080 m, 頭部長 L_1 を 0.025 m, 体高 H_0 を 0.020 m, 尾部の高さ H_1 を 0.010 m, 体長 2 分の 1 のところの体高 H_2 を 0.017 m とすると, 式(9)より, 魚体がインペラ先端との接触により受ける単位面積当たりの圧力は 71 kPa と試算される。この接触圧力による魚体の損傷は認められなかった。

揚水量 既述したように, インペラ先端の周速度が 2.26 m/s 以上になると, 魚水はケーシング内壁に沿っ

て回転して揚魚されないの, 同周速度 2.26 m/s 以下の揚水量について検討する。同周速度 1.88 m/s では, 水槽の水面より 1 ピッチ以内の魚水はケーシング内壁に沿って回転する。ここで, Fig. 4 にインペラのピッチ当たりの水ブロックの形状を示す。解析を容易にするため, Fig. 4a の点線 BE は螺旋角 β が零の場合の, また実線 B'E' は任意な螺旋角 β のインペラの垂直断面を示し, それぞれの中心を点 O および同 O' とする。直線 AD (矢印 X 方向から見た Fig. 4b に示す橢円弧 ADC) および同 A'D' (矢印 X 方向から見た Fig. 4b に示す橢円弧 ADC と相似する) は, それぞれの螺旋角 β 零および任意な螺旋角 β のインペラにおけるピッチ p 当たりの水ブロックの垂直断面を示す。Fig. 4b に示す橢円弧 ADC は矢印 X 方向から見たピッチ当たりの水ブロックの表面を, また直線 AC は, 矢印 X 方向から見た水ブロックの螺旋角 β が零の時のインペラとの接線である。インペラの螺旋角 β が零の場合は, Fig. 4c に示すピッチ当たりの水ブロックの形状はひずめ形となり, 同体積 V_1 (m³) は式(10)で示される。⁸⁾

$$V_1 = \frac{r^3}{3 \tan \theta} \{ \sin \alpha_i (2 + \cos^2 \alpha_i) - 3 \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \} \quad (10)$$

Fig. 4. Shape of the water block per pitch in the spiral impeller mechanism.

O: center of the spiral impeller for spiral angle of zero, O': center of the spiral impeller for spiral angle β , BE: vertical section of the spiral impeller for spiral angle of zero, B'E': vertical section of the spiral impeller for spiral angle β , AD: vertical section of water block surface per pitch on spiral impeller surface for spiral angle of zero, A'D': vertical section of water block surface per pitch on spiral impeller surface for spiral angle β , AC: boundary line of water block per pitch in direction of arrow X when the spiral angle is zero, ellipse curve ADC: water block surface per pitch, $2\alpha_i$: center angle of water block on the spiral impeller surface, β : spiral angle.

ただし、ケーシング内の半径を r (m)、ケーシングの傾斜角を θ (°)、インペラ面における水ブロックの円心角を $2\alpha_i$ (°) とする。

直線 BE と同 B'E の間の水ブロックの立体形状を Fig. 4d に示し、円弧 ABC および同 A'B'C' は、螺旋角 β 零および任意な螺旋角 β の場合における水ブロックとインペラの接触面を表す。Fig. 4a に示すように、 $2\alpha_i$ を 180° とすると、BB' はピッチ p の 2 分の 1 を示し、点 A、同 O および同 C は直線になり、垂直断面 ABB'A' の体積 V_2 は式(11)で示される。

$$V_2 = \frac{3}{16} \pi p r^2 \quad (11)$$

螺旋角 β が零および任意な水ブロック表面の位置差により、断面 AD'DA' の体積 V_3 は式(12)で示される。

$$V_3 = \frac{1}{8} \pi p r^2 \quad (12)$$

式(10)、同(11)および同(12)より、ピッチ p 内の水の体積 V_p は式(13)で示される。

$$V_p = \frac{2r^3}{3 \tan \theta} + \frac{\pi p r^2}{16} \quad (13)$$

インペラ先端とケーシング内壁のクリアランスを限りなく零とすると、式(13)より本インペラ機構の単位時間当たりの揚水量 Q_w (m³/h) は式(14)で示される。

$$Q_w = \left(\frac{1200}{\pi \tan \theta} + 225\pi \tan \beta \right) \cdot r^2 V_{pe} \quad (14)$$

ただし、インペラの任意な螺旋角を β とする。

Fig. 5 にケーシングの傾斜角 35° および 42° におけるインペラ先端の周速度と揚水量の関係を示す。揚水量の理論値が実測値より小さくなる原因は、ナイロン製ケーシングが水の重力で変形して水ブロックの体積が理論値より若干多くなったためと考えられる。理論値と実測値の比較から、ピッチ当たりの変形量は 8.5×10^{-5} m³ と推定される。

また、傾斜角 θ が 42° の場合におけるインペラ機構の揚水量とインペラ先端の周速度の関係を Fig. 6 に示す。ケーシング内の半径 r が 0.25 m、インペラ先端の周速度が 1.88 m/s の場合には、本インペラ機構の最大揚水量は 56.4 m³/h となる。

漏水量 回転軸方向のケーシング断面における垂直方向となす円心角 δ の漏水速度 V_L (m/s) は式(15)で示される。

$$V_L = \sqrt{2gr(1 - \cos \delta)} \quad (15)$$

インペラとケーシング内壁のクリアランスは極めて小さいので、インペラの半径 r_i はケーシング内の半径 r と同程度と見られる。微小円心角を $d\delta$ (°) とすると、インペラとケーシング内壁のクリアランス s (mm) の微小面積 dA_L (m²) は式(16)で示される。

Fig. 5. Relationship between the quantity of pumped up water and number of pumped up fry, and the inclination angle of the casing and the clearance between the spiral impeller and inside wall of the casing.

θ : inclinational angle of the casing, s : clearance between the spiral impeller and inside wall of the casing, radius of spiral impeller is 0.072 m, volume ratio of fry and water is 0.30. (—: theoretical values, ---: experimental values).

$$dA_L = \frac{10^{-4} \pi r_i s}{18} \cdot d\delta \quad (16)$$

ただし、インペラの半径を r_i (m) とする。

漏水速度 V_L (m/s) 時におけるインペラとケーシング内壁のクリアランスの微小面積 dA_L の単位時間当たりの漏水量 dq (m³/s) は式(17)で示される。

$$dq = V_L \cdot dA_L \quad (17)$$

式(15)、同(16)および同(17)より、ピッチ当たりの漏水量 q (m³/s) は式(18)で示される。

$$q = \frac{10^{-4} \pi r s}{9} \int_0^{\alpha_i} \sqrt{2gr(1 - \cos \delta)} \cdot d\delta \quad (18)$$

インペラにおける水ブロックの円心角 $2\alpha_i$ を 180° とすると、式(18)より、ピッチ当たりの漏水量 q (m³/s) は式(19)で示される。

$$q = \frac{(2 - \sqrt{2}) \cdot 10^{-4}}{45} \pi s g^{1/2} r^{3/2} \quad (19)$$

式(14)および同(19)より、インペラ先端の周速度を V_{pe} とすると、 N ピッチのインペラ機構の揚水量 Q_N (m³/h) および漏水量 Q_L は式(20)および同(21)で示される。

$$Q_N = \left(\frac{1200}{\pi \tan \theta} + 225\pi \tan \beta \right) \cdot r^2 V_{pe} - \frac{(8 - 4\sqrt{2}) \cdot 10^{-2}}{5} \pi N s g^{1/2} r^{3/2} \quad (20)$$

$$\chi = \frac{(8-4\sqrt{2}) \cdot 10^{-4} \pi N s \sqrt{g \tan \theta}}{(60r + 11.25\pi^2 \tan \theta \cdot \tan \beta) V_{pe} \sqrt{r}} \quad (21)$$

インペラとケーシング内壁のクリアランス s が 0.5 mm の場合、水中の微細な塵埃および前項のケーシングの若干の変形などが原因で、インペラ先端がケーシング内壁と接触摩擦するためインペラは回転しなかった。ここで、ケーシングの傾斜角 θ を 35° 、インペラの半径 r を 0.072 m、インペラ先端の周速度 V_{pe} を 1.88 m/s、インペラのピッチ数 N を 9 とすると、式(21)より、インペラとケーシング内壁のクリアランス s が 1.0 mm および 1.5 mm の場合の漏水率 χ は、極めて少量の 0.036% および 0.054% と試算されるので、実用的な揚水量には殆ど影響しないものと推定される。

また、ケーシング内の半径はインペラの半径 r と同程度と見られるので、インペラの回転軸径を r_s とすると、ピッチあたりに相当するケーシング内の水容積 V_c は式(22)で示される。

$$V_c = \pi p (r^2 - r_s^2) \quad (22)$$

式(14)および同(22)より、本インペラ機構の揚水量 σ は式(23)で示される。

$$\sigma = \frac{(1200 + 225\pi^2 p \tan \theta \cdot \tan \beta) \cdot r V_{pe}}{2\pi^3 (r^2 - r_s^2) \tan \theta \cdot \tan \beta} \quad (23)$$

揚魚量 魚体と水との容積比率（以降、魚水比と称する）を η 、単尾当たりの魚体容積を v (cm³/尾) とすると、式(14)より、単位時間当たりの揚魚尾数（以降、揚魚量と称する） ψ (尾/h) は式(24)で示される。

$$\psi = \frac{10^6 \cdot (1200 + 225\pi^2 \tan \theta \cdot \tan \beta) r^2 V_{pe} \cdot \eta}{v \pi \tan \theta} \quad (24)$$

式(24)より、揚魚能力を高めるためには、魚水比を高くする必要がある。しかし、魚水比を高くすると、魚体の相互摩擦、並びに魚体がインペラとの衝突時に回避する水域が減少するので、魚体の損傷発生が危惧される。単尾当たりの魚体容積を 8 cm³/尾とすると、揚魚水域における放流魚数が 5 尾、10 尾および 25 尾の場合の魚水比は、おおよそ 0.012, 0.024 および 0.060 となる。また、ピッチ当たり 2 尾、3 尾および 4 尾の魚水比は、おおよそ 0.044, 0.066 および 0.087 となる。

取込口へ幼魚を追込むと、ビデオ画像の解析によれば取込口付近の魚水比は約 0.30 と揚魚水域より高くなるが、インペラ先端の周速度 1.88 m/s では、魚体の損傷は認められなかった。

ここで、ピッチ内の魚水比 η を 0.30、単尾当たりの魚体容積 v を 8 cm³/尾とすると、式(24)より、本インペラ機構（ケーシング内の半径 0.072 m）におけるインペラ先端の周速度と揚魚量の関係を Fig. 5 に示す。ケーシングの傾斜角が 35° および 42° の場合、インペラ先

Fig. 6. Relationship between the peripheral velocity of the spiral impeller, theoretical quantity of pumped up water and number of pumped up fry.

r : radius of spiral impeller, inclination angle θ of the casing is 42° , volume ratio of fry and water is 0.30.

端の周速度 1.88 m/s における揚魚量は、実測値が 36.0 万尾/h および 26.7 万尾/h、理論値が 27.0 万尾/h および 22.2 万尾/h と試算される。また、インペラの螺旋角 β を 14.4° とすると、ケーシングの傾斜角 42° におけるインペラ先端の周速度と試算揚魚量の関係を Fig. 6 に示す。ケーシング内の半径 r を 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m および 0.25 m とすると、インペラ先端の周速度 1.88 m/s 時の揚水量は 26.6 m³/h, 39.8 m³/h, 53.1 m³/h および 66.4 m³/h となり、揚魚量はおおよそ時間当たり 9.6 万尾, 150.0 万尾, 199.2 尾および 249.0 万尾と試算される。

本揚魚システムは計数部への幼魚の大量移送手段として有効と認められる。

文 献

- 1) 藤本 宏: 魚数計を用いたトラフグ種苗の計数について. さいばい, **65**, 27-33 (1993).
- 2) 陳 涇, 矢田貞美, 酒井久治: 種苗幼魚の吸引計数精度に及ぼす気泡の影響. 水産工学, **30**, 101-106 (1993).
- 3) 矢田貞美, 陳 涇, 酒井久治, 秋澤速夫: 種苗幼魚の吸引計数システムに関する研究. 水産工学, **30**, 93-100 (1993).
- 4) 陳 涇, 矢田貞美: レーザ光線による幼魚の体長計測精度に関する研究. 水産工学, **31**, 27-32 (1994).
- 5) 植松時雄, 中村貞男, 日野保夫, 陶山英雄: ねじコンベヤの研究. 日本機械学会論文集, **26**(162), 180-186 (1960).
- 6) 片岡義雄: 水力学, コロナ社, 東京, 1981, p. 140.
- 7) 日本流体力学会: 流体力学ハンドブック, 丸善, 東京, 1987, p. 233.
- 8) 日本機械学会: 機械工学便覧 (数学), 日本機械学会, 東京, 1989, p. 41.