

# 水車効率新換算法

## A New Method of Conversion for Waterturbine Efficiency

手島友亮\*  
Tomosuke Tejima

### 内 容 梗 概

水車効率の換算の方法に関しては既に多数の計算式が提案されているが、いずれの式も任意の落差、任意の流量時の性能を随意に換算するには今なお十分とはいえず、特に偏落差運転時の性能換算に適するものは見当たらないようである。筆者は水車に生ずる諸損失を個々の水車構成部品ごとに分離解析して、各種の水車について、それぞれ性質の異なる諸損失ごとに分類統合整理して、水車の全損失を示す式を導き、各性質別の損失ごとの相似性を検討して、総合的な効率換算の基本式をフランシス水車およびカプラン水車について別個に導出した。さらに、実験結果をもとに諸性質ごとの損失量の大きさを吟味して、水車の損失の大半を占める主要損失に着目して前に導出した換算の基本式を簡易化して、実用的な近似換算式を見いだした。これらのフランシス水車とカプラン水車に関する実用換算式を既存の代表的な諸換算式と対比して、その特長を論じ、あわせて、それぞれの水車に関する現地効率試験の成績と対比した一例を掲げ、その近似性のよいことを実証した。

### 1. 緒 言

大容量の水車を製作するにあたって、幾何学的に相似な小形の模型水車を造って、事前にその性能を研究する手法は古くから行なわれているが、この場合、模型試験の結果から、大形の実物水車の性能を推定するために効率換算式が考案されてきた。この効率換算方法の研究は Camerer が 1909 年に水車に生ずる摩擦損失を換算する方法を考えて以来、摩擦損失の性質を検討して多数の換算式が多くの研究者によって発表された<sup>(1)~(12)</sup>。その後、部分負荷運転時における効率を換算するために衝撃損失をとり入れて、流量の変化を考慮した方法<sup>(13)~(15)(17)</sup>が考案され効率換算可能の領域が大幅に拡大された。さらに、最近揚水発電所の建設が盛んになって大幅な変落差の運転を行なう機会が多くなるに及んで、落差の変化を考慮した効率換算の方法が必要となり、ここに流量と落差の同時変化にも適用される換算式が望ましいこととなる。筆者は、今回、水車に生ずる損失を流体損失、漏えい損失および機械損失に分けて考え、さらに、流体損失を摩擦損失、衝撃損失、わん曲損失、広がりまたは狭まり損失、排棄損失などに分けて、個々にその損失の一般的性質を検討し、フランシス水車、プロペラ水車およびカプラン水車について、それぞれの水車の構造上、運転上の特異性を採り入れて、おのおの水車に生ずる全損失を換算する効率換算の基本式を導出した。また、各種の損失について、その大きさを吟味検討して微小量の損失を無視し、大半を占める主要損失に着目し、実用的な効率換算式を導いて、従来発表されている各種の効率換算式と対比して換算式の性格を論じ、あわせて、現地効率測定試験の結果と対比し相似性を確かめた。

### 2. 水車に生ずる諸損失

水車の全効率  $\eta$  は一般に流体効率  $\eta_h$ 、容積効率  $\eta_v$ 、機械効率  $\eta_m$  からなり、次の式で表わされる。

$$\eta = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \dots\dots\dots (1)$$

さらに、 $\eta_h$ 、 $\eta_v$ 、 $\eta_m$  はそれぞれ有効落差  $H$  に対する全流体損失水頭  $h_h$  の比  $h_h/H$ 、水車流量  $Q$  に対する漏えい水量  $Q_v$  の比  $Q_v/Q$ 、および水車入力  $L$  に対する損失動力  $L_m$  の比  $L_m/L$  を用いて、一般に次の式で表わされる。

$$\eta_h = 1 - \frac{h_h}{H} \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_v = 1 - \frac{Q_v}{Q} \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_m = 1 - \frac{L_m}{L} \dots\dots\dots (4)$$

いま、(3)式および(4)式を(2)式と同じように有効落差  $H$  に対する損失水頭  $h$  の比  $h/H$  の形にかきかえると、それぞれ、

$$\eta_v = 1 - \frac{h_v}{H} \dots\dots\dots (3)'$$

$$\eta_m = 1 - \frac{h_m}{H} \dots\dots\dots (4)'$$

となる。(2)、(3)'、(4)'式中の  $h_h$ 、 $h_v$ 、 $h_m$  をすべて単位有効落差  $H=1m$  相当の値にして  $h_{1h}$ 、 $h_{1v}$ 、 $h_{1m}$  とし、さらに、任意の状態における値を示すものとして添字  $i$  を付け  $h_{1hi}$ 、 $h_{1vi}$ 、 $h_{1mi}$  と表わせれば、(1)式は(2)、(3)'、(4)'式の関係から、次のように書ける。

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m = (1 - h_{1hi})(1 - h_{1vi})(1 - h_{1mi}) \\ &= 1 - h_{1hi} - h_{1vi} - h_{1mi} + h_{1hi}h_{1vi} + h_{1vi}h_{1mi} + h_{1mi}h_{1hi} - h_{1hi}h_{1vi}h_{1mi} \\ &\doteq 1 - h_{1hi} - h_{1vi} - h_{1mi} = 1 - \sum h_{1i} \dots\dots\dots (1)' \end{aligned}$$

#### 2.1 流体損失の解析

全流体損失水頭  $h_{1hi}$  は主として流水面の表面摩擦損失水頭  $h_{1fi}$ 、衝撃損失水頭  $h_{1si}$ 、流路の曲りによるわん曲損失水頭  $h_{1bi}$ 、流路の拡大縮小に伴う広がりまたは狭まり損失水頭  $h_{1ai}$  および排棄損失  $h_{1di}$  などからなるものと考えられ、流路の入口、出口の平均流速  $V_{1i}$ 、 $V'_{1i}$  および衝撃速度  $U_{1i}$  を用いて、それぞれ、 $h_{1fi} = \xi_f \frac{V_{1i}^2}{2g}$ 、 $h_{1si} = \xi_s \frac{U_{1i}^2}{2g}$ 、 $h_{1bi} = \xi_b \frac{V_{1i}^2}{2g}$ 、 $h_{1ai} = \xi_a \frac{V_{1i}^2}{2g}$ 、 $h_{1di} = \frac{V'_{1i}{}^2}{2g}$  として表わされ、したがって、 $h_{1hi}$  は

$$\begin{aligned} h_{1hi} &= h_{1fi} + h_{1si} + h_{1bi} + h_{1ai} + h_{1di} \\ &= \xi_f \frac{V_{1i}^2}{2g} + \xi_s \frac{U_{1i}^2}{2g} + \xi_b \frac{V_{1i}^2}{2g} + \xi_a \frac{V_{1i}^2}{2g} + \frac{V'_{1i}{}^2}{2g} \dots (5) \end{aligned}$$

(5)式で表わせる。

いま、水車を構成する個々の部品、すなわち、渦巻形ケーシングスピードリング、ガイドペーン、ランナ、ドラフトチューブについて、おのおのその流体損失を解析して、種類の異なるおのおの水車ごとに、その構造上、運転上の特異性を採り入れて全流体損失水頭  $h_{1hi}$  を導出する。

#### 2.1.1 渦巻形ケーシングの流体損失 $h_{1ci}$

水車の渦巻形ケーシングをその各断面の中心を通る渦巻線に沿った管路とみなし、入口の平均流速  $V_{1ci}$  を用いて、摩擦損失  $h_{1cfi}$ 、

\* 日立製作所日立研究所 工博

わん曲損失  $h_{1cbi}$ , および広がりまたは狭まり損失  $h_{1cai}$  の総和からなるものとしてまとめると

$$h_{1ci} = \left( \lambda \frac{l_c}{d_c} K_{c1} + K_{c2} \right) \frac{V_{1ci}^2}{2g} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに,  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$  は個々の水車について, その構造からきまる固有値となる係数。

2.1.2 スピードリングの流体損失  $h_{1spi}$

スピードリング内の流れはステーション間の流線に沿ったベルマウス状の入口ノズルと類似な流れとして, スピードリング入口の流速  $V_{1spi}$  を用い

$$h_{1spi} = K_{sp1} \frac{V_{1spi}^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに, 係数  $K_{sp1}$  は個々の水車に関し, その形状からきまる固有値となる。

2.1.3 ガイドベーンの流体損失  $h_{1gvi}$

相隣れる 2 枚のガイドベーンで形成される管路を矩形断面の漸縮流路と考へて, 摩擦損失  $h_{1GVfi}$  と狭まり損失  $h_{1GVai}$  からなるものとし, また, 水車が最高効率を示す開度以外のガイドベーン開度においては衝撃損失  $h_{1GVsi}$  があるものと考え, 水車が最高効率を示す場合の流量  $Q_{1s}$  からのへだたりを示す変化関数として, 次式の  $q$  を用いてガイドベーンの全流体損失  $h_{1gvi}$  をまとめると

$$q = \frac{Q_{1s}}{Q_{1i}} \dots\dots\dots (8)$$

$$h_{1gvi} = \left( \lambda \frac{l_{gi}}{4m_{gi}} K_{GV1} + q^2 K_{GV2} + K_{GV3} \right) \frac{V_{1gvi}^2}{2g} \dots\dots\dots (9)$$

とかける。ここに,  $V_{1gvi}$  はガイドベーンの入口速度, 係数  $K_{GV1}$ ,  $K_{GV2}$ ,  $K_{GV3}$  は個々の水車の構造, 形状が決まれば一義的に決まる固有値となる。

2.1.4 ランナの流体損失  $h_{1ri}$

ランナの流体損失は水車の種類が異なるとランナの形状, 構造により, また, 運転方法などによって, その損失の構成と性格が著しく変わるが, ランナの流体損失  $h_{1ri}$  は一般に流水面の摩擦損失  $h_{1RFi}$ , 衝撃損失  $h_{1Rsi}$ , および排棄損失  $h_{1Rdi}$  からなるものと考えられ, 損失解析の結果はランナ入口のメリディアン速度  $C_{1Ri}$  を用いて, それぞれ次のように表わされる。

(1) フランス水車ランナでは

$$h_{1FRi} = \left[ f \{ K_{R1} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{R2} \} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{R3} + (n-1)^2 q^2 K_{R4} + q^2 K_{R5} \right] \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \dots\dots\dots (10)$$

(2) プロペラ水車ランナでは

$$h_{1PRi} = \left[ f \{ K_{R1} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{R2} \} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{R3} + (n-1)^2 q^2 K_{R4} + q^2 K_{R5} \right] \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \dots\dots\dots (11)$$

(3) カプラン水車ランナでは

$$h_{1KRi} = \left\{ f K_{R1} + (n-1)^2 q^2 K_{R2} + K_{R3} \right\} \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \dots\dots\dots (12)$$

ここに, (10)~(12) の諸式の  $K_{R1}$ ,  $K_{R2}$ ,  $\dots$ , の諸係数は個々の水車について, その構造寸法などの物理的諸元の比から一義的に定まる固有値,  $f$  は表面摩擦損失係数,  $n$ ,  $q$  は回転数, 落差, 流量の諸量が最高効率を示す運転状態からの偏位程度を示す関数で

$$n = \frac{N_{1i}}{N_{1s}} \dots\dots\dots (13)$$

$$q = \frac{Q_{1s}}{Q_{1i}} \dots\dots\dots (8)$$

なる性格のものであり,  $\gamma_{R1}$ ,  $\gamma_{R2}$  は速度三角形を形成するガイドベーンとランナベーンの角度関係比を示す関数で, 水車の運転条件によって流量または落差の変化によって変わる性質をもっている。

2.1.5 ドラフトチューブの流体損失  $h_{1DTi}$

ドラフトチューブの効率  $\eta_{DTi}$  は, その吸出上昇圧力水頭を  $\epsilon_{1di}$ , 摩擦損失  $h_{1DTfi}$ , 広がり損失を  $h_{1DTai}$ , わん曲損失を  $h_{1DTbi}$  および排棄損失を  $h_{1DTdi}$  とすれば, 下の式で表わされる。

$$\eta_{DTi} = 1 - \frac{h_{1DTfi} + h_{1DTai} + h_{1DTbi} + h_{1DTdi}}{\epsilon_{1di}} \dots\dots\dots (14)$$

いま, それぞれの水車の運転特性をとり入れて考える。すなわち, 固定羽根ランナのドラフトチューブ入口部の流動状態の特異性をフランス水車について実測した結果<sup>(20)</sup>をとり入れて, (8) 式の  $q$  と (13) 式の  $n$  および摩擦係数  $\lambda$  の関数として, ドラフトチューブ入口の軸方向の実速度  $C_{1DTi}$  に関してとりまとめると固定羽根水車では

$$h_{1DTi} = \left[ \lambda \frac{l_{DT}}{d_{DT}} \{ 1 + (n-1)^2 \} K_{DT1} + K_{DT2} \right] \frac{C_{1DTi}^2}{2g} \dots\dots\dots (15)$$

となり, 可動羽根のカプラン水車では

$$h_{1DTi} = \left[ \lambda \frac{l_{DT}}{d_{DT}} \{ 1 + (n-1)^2 q^2 \} K_{DT1} + K_{DT2} \right] \frac{C_{1DTi}^2}{2g} \dots\dots\dots (16)$$

ここに, 係数  $K_{DT1}$ ,  $K_{DT2}$  は個々の水車について構造寸法などの物理的諸元の割合から一義的にきまる固有値である。

2.2 漏えい損失

漏えい損失  $Q_{vi}/Q_i$  を損失水頭  $h_{vi}$  の形にかきかえよう。いま, ランナの外周の間げき部から  $Q_{vi}$  の水が漏えいするには間げき部の前後に  $h_{vi}$  の水頭差を必要とするものとし, この  $h_{vi}$  は間げき部の漏えい水の絶対速度を  $W_{vi}$  で表わせば, 間げき部の摩擦損失  $h_{vfi}$ , 入口損失  $h_{vsi}$ , および出口から流出する水のもつ運動のエネルギー  $h_{vdi}$  からなるものと考えられ,

$$h_{vi} = h_{vfi} + h_{vsi} + h_{vdi} = f \frac{l_v}{m_v} \frac{W_{vi}^2}{2g} + \zeta_v \frac{W_{vi}^2}{2g} + \frac{W_{vi}^2}{2g} \dots\dots\dots (17)$$

ここに,  $W_{vi}$  は間げき漏えい断面に直角方向の流速  $V_{vi}$  に対し

$$V_{vi} = W_{vi} \cos \delta_{vi} \dots\dots\dots (18)$$

なる関係にあり,  $\delta_{vi}$  は水車の回転数  $N_i$  に比例して変わる角度である。したがって, 漏えい水量  $Q_{vi}$  はランナ外周の間げき部断面積を  $A_v$  とすれば

$$Q_{vi} = A_v \times V_{vi} = A_v \cdot W_{vi} \cos \delta_{vi} \dots\dots\dots (19)$$

(19) 式に (17) 式の関係代入すると

$$Q_{vi} = A_v \cdot \frac{\cos \delta_{vi}}{\sqrt{f \frac{l_v}{m_v} + \zeta_v + 1}} \cdot \sqrt{2gh_{vi}} \dots\dots\dots (19)'$$

また, (19)' 式の関係を用いて (17) 式を書き換えると

$$h_{vi} = \left( f \frac{l_v}{m_v} + \zeta_v + 1 \right) \left( \frac{Q_{vi}}{A_v} \right)^2 \sec^2 \delta_{vi} \frac{1}{2g} \dots\dots\dots (17)'$$

と表わせる。一方, 水車流量は  $Q_i$  ガイドベーンの開度を  $\Delta g_i$ , 幅を  $b_g$ , 枚数を  $z_g$ , 流出係数を  $c_{gi}$  とすれば, 有効落差  $H_i$  のとき

$$Q_i = \Delta g_i \cdot b_g \cdot z_g \cdot c_{gi} \cdot \sqrt{2gH_i} \dots\dots\dots (20)$$

と表わされ, 書き換えると

$$H_i = \left( \frac{Q_i}{\Delta g_i \cdot b_g \cdot z_g \cdot c_{gi}} \right)^2 \frac{1}{2g} \dots\dots\dots (20)'$$

となる。ここに, 漏えい水のもつ動力  $\gamma Q_{vi} h_{vi} / 102.04$  (kW) はラン

ナに有効な仕事をせず水車入力  $\gamma Q_i H_i / 102.04$  (kW) の中から失われる。したがって、漏えい損失を水車効率にとり入れるために水車入力に対する漏えい水のもつ動力の割合を水車の有効落差  $H_i$  に対する損失水頭  $h_{vi}'$  の割合で示すと

$$\frac{h_{vi}'}{H_i} = \frac{\frac{\gamma Q_{vi} h_{vi}}{102.04}}{\frac{\gamma Q_i H_i}{102.04}} = \frac{Q_{vi} h_{vi}}{Q_i H_i} \dots\dots\dots (21)$$

なる関係にある。この(21)式に(17)'と(20)'式の関係代入し、 $\sec \delta_{vi} \propto N_i$ なることを考慮して、さらに、構造寸法などの物理的諸元の割合から一義的にきまる項を一括整理し、単位有効落差  $H_i=1$  相当時の損失水頭  $h_{1vi}'$  の形にまとめると

$$h_{1vi}' = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{V1} + K_{V2}) \dots\dots\dots (22)$$

となる。ここに  $K_{V1}$ ,  $K_{V2}$  の係数は個々の水車については固有値である。(22)式によって漏えい損失を損失水頭で表わすことができた。

2.3 機 械 損 失

水車の機械損失の中に軸承損失があるが、現在の模型試験法では模型水車の軸承は実物水車の軸承とは無関係に、実験に便利なようにできている。また、同一の実験設備で各種の水車を実験するためには、一般にどうしても過大な軸承が装着されることとなり、模型試験の際には比較的大きい軸承損失が存在することとなるが模型水車の軸承損失は実験装置について固有のもので、別個にあらかじめ実測して模型水車の性能に加算するならわしとなっている。また、実物水車の軸承損失は水車が発電機と合体して運転されるため、水車軸承以外の諸軸承の損失は水車と発電機のいずれの負担となるか明確でない。たとえば推力軸承にあっては発電機の容量に余裕をもたせ重量が重い発電機を装着すれば、おのずからその損失は大きくなるが、必ずしも水車の負担によって増加したものではない。一方、現実に大容量水車にあっては水車入力に比べ軸承の損失は非常に小さいとして、一般に実物水車の効率算出には考慮されない場合がほとんどである。これら軸承損失はその取り扱いが明確でなく、また、大容量機器では微量であることから、ここでは論じないこととする。しかし、フランス水車にあってはランナの背面に円板摩擦損失があるのでその性質について検討してみる。フランス水車の背面は一種の円板と考えられるから、一般の円板摩擦損失を求める式を用いて、摩擦損失係数  $f$ 、角速度  $\omega_i$ 、半径  $r$ 、水の単位体積重量を  $\gamma$  とすれば、損失動力  $F_i$  は

$$F_i = 2 \pi f \gamma \frac{\omega_i^2}{2g} \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr \dots\dots\dots (23)$$

で求められる。ランナの外周  $R_2$  は軸径  $R_1$  に比べ  $R_2 \gg R_1$  として積分し、さらに、単位面積当たりの損失水頭を  $h_{miI}$  としてまとめると、ランナ外周の速度  $u_{2i}$  を用いて

$$h_{miI} = \frac{1}{2} f \frac{u_{2i}^2}{2g} \dots\dots\dots (24)$$

同様にして、ランナ外周面では

$$h_{miII} = \frac{1}{3} f \frac{u_{2i}^2}{2g} \dots\dots\dots (25)$$

(24)式と(25)式から  $h_{miI}$  と  $h_{miII}$  とは、次の関係にある。

$$h_{miII} = \frac{2}{3} h_{miI} \dots\dots\dots (26)$$

いま、円板摩擦によって消費する動力  $L_{mi}$  は損失トルクを  $T_i$  とすれば

$$L_{mi} = \frac{\omega_i T_i}{102.04} \dots\dots\dots (27)$$

で表わされる。(23)~(26)式の諸関係を用いて(27)式を変形すると

$$L_{mi} = \frac{1}{102.04} u_{2i} \left( \frac{4}{5} A_1 + \frac{1}{2} A_2 \right) \gamma h_{miI} \dots\dots\dots (27)'$$

ここに、 $A_1$ ,  $A_2$  はそれぞれランナの背面および外周面の面積を示す。

一方、水車入力  $L_i$  (kW) は前述したように

$$L_i = \frac{\gamma Q_i H_i}{102.04} \dots\dots\dots (28)$$

となるから、 $Q_i$  を(20)式の関係を用いて  $H_i$  の関数としてかきかえると、 $L_{mi}/L_i$  は  $h_{miI}/H_i$  の関係となる。さらに、個々の水車の構造寸法など物理的諸元の割合から一義的に定まるものを一括して  $K_{m1}$  とおき、損失水頭を  $h_{1mi}$  として表現すれば

$$h_{1mi} = \left( \frac{L_{1mi}}{L_{1i}} \right)^{\frac{2}{3}} f^{\frac{1}{3}} K_{m1} \dots\dots\dots (29)$$

となる。

以上で、水車に生ずる損失を個々の部品について解析し、それらをすべて損失水頭で表現することができた。

2.4 水車の種類ごとの全損失

これまでに解析してきた諸損失を水車の種類別にとりまとめてみると次のようになる。

(1) フランス水車では(6), (7), (9), (10), (15), (22) および(29)式をとりまとめ、

$$\begin{aligned} \Sigma h_{1Fi} = & \left( \lambda \frac{l_c}{d_c} K_{c1} + K_{c2} \right) \frac{V_{1ci}^2}{2g} + K_{1spi} \frac{V_{1spi}^2}{2g} \\ & + \left( \lambda \frac{l_{gi}}{4 m_{gi}} K_{GV1} + q^2 K_{GV2} + K_{GV3} \right) \frac{V_{1GVi}^2}{2g} \\ & + [f \{K_{R1} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{R2}\} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{R3} \\ & + (n-1)^2 q^2 K_{R4} + q^2 K_{R5}] \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \\ & + \left[ \lambda \frac{l_{DT}}{d_{DT}} \{1 + (n-1)^2\} K_{DT1} + K_{DT2} \right] \frac{C_{1DTi}^2}{2g} \\ & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{V1} + K_{V2}) \\ & + \left( \frac{L_{1mi}}{L_{1i}} \right)^{\frac{2}{3}} f^{\frac{1}{3}} K_{m1} \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

(2) プロペラ水車では(6), (7), (9), (11), (15)および(22)式をとりまとめ、

$$\begin{aligned} \Sigma h_{1Bi} = & \left( \lambda \frac{l_c}{d_c} K_{c1} + K_{c2} \right) \frac{V_{1ci}^2}{2g} + K_{spi} \frac{V_{spi}^2}{2g} \\ & + \left( \lambda \frac{l_{gi}}{4 m_{gi}} K_{GV1} + q^2 K_{GV2} + K_{GV3} \right) \frac{V_{1GVi}^2}{2g} \\ & + [f \{K_{R1} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{R2}\} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{R3} \\ & + (n-1)^2 q^2 K_{R4} + q^2 K_{R5}] \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \\ & + \left[ \lambda \frac{l_{DT}}{d_{DT}} \{1 + (n-1)^2\} K_{DT1} + K_{DT2} \right] \frac{C_{1DTi}^2}{2g} \\ & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{V1} + K_{V2}) \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

(3) カプラン水車では(6), (7), (9), (12), (16)および(22)式をとりまとめ、

$$\begin{aligned} \Sigma h_{1Ki} = & \left( \lambda \frac{l_c}{d_c} K_{c1} + K_{c2} \right) \frac{V_{1ci}^2}{2g} + K_{spi} \frac{V_{spi}^2}{2g} \\ & + \left( \lambda \frac{l_{gi}}{4 m_{gi}} K_{GV1} + q^2 K_{GV2} + K_{GV3} \right) \frac{V_{1GVi}^2}{2g} \\ & + [f K_{R1} + (n-1)^2 q^2 K_{R2} + K_{R3}] \frac{C_{1Ri}^2}{2g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[ \lambda \frac{L_{DT}}{d_{DT}} \{1 + (n-1)^2 q^2\} K_{DT1} + K_{DT2} \right] \frac{C_{1DT}^2}{2g} \\
 & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{V1} + K_{V2}) \dots \dots \dots (32)
 \end{aligned}$$

この(30)~(32)式は個々の部品ごとの代表流速を用いているので水車全体の代表流速  $V_{1i}$  を用いてかきかえ、さらに、水車の構造寸法などの物理的諸元の割合から一義的に定まる諸係数を取りまとめ、水車の種類ごとに  $K_{F1}, K_{F2}, \dots, K_{P1}, K_{P2}, \dots, K_{K1}, K_{K2}, \dots$  とし、 $f, \lambda, q, n$  の関数に着目して整理すると

(1) フランス水車に関する(30)式は

$$\begin{aligned}
 \Sigma h_{1Fi} = & \left[ \lambda \Sigma \frac{l}{m} \{K_{F1} + (n-1)^2 K_{F2}\} \right. \\
 & + f \{K_{F3} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{F4}\} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{F5} \\
 & \left. + (n-1)^2 q^2 K_{F6} + q^2 K_{F7} + K_{F8} \right] \frac{V_{1i}^2}{2g} \\
 & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{F9} + K_{F10}) \\
 & + \left( \frac{L_{1mi}}{L_{1i}} \right)^{\frac{2}{3}} f^{\frac{1}{3}} K_{F11} \dots \dots \dots (33)
 \end{aligned}$$

(2) プロペラ水車に関する(31)式は

$$\begin{aligned}
 \Sigma h_{1Pi} = & \left[ \lambda \Sigma \frac{l}{m} \{K_{P1} + (n-1)^2 K_{P2}\} \right. \\
 & + f \{K_{P3} + (nq - \gamma_{R1})^2 K_{P4}\} + (nq - \gamma_{R2})^2 K_{P5} \\
 & \left. + (n-1)^2 q^2 K_{P6} + q^2 K_{P7} + K_{P8} \right] \frac{V_{1i}^2}{2g} \\
 & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{P9} + K_{P10}) \dots \dots \dots (34)
 \end{aligned}$$

(3) カプラン水車に関する(32)式は

$$\begin{aligned}
 \Sigma h_{1Ki} = & \left[ \lambda \Sigma \frac{l}{m} \{K_{K1} + (n-1)^2 q^2 K_{K2}\} \right. \\
 & \left. + f K_{K3} + (n-1)^2 q^2 K_{K4} + q^2 K_{K5} + K_{K6} \right] \frac{V_{1i}^2}{2g} \\
 & + \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1i}} \right)^3 N_{1i}^2 (f K_{K7} + K_{K8}) \dots \dots \dots (35)
 \end{aligned}$$

なる三つの式にまとめられる。

### 3. 効率換算式の導出

模型水車の試験時の有効落差を  $H_i'$ 、全損失を  $\Sigma h_i'$  とし、実物水車の有効落差を  $H_i$ 、全損失を  $\Sigma h_i$  とすれば、模型水車の効率  $\eta_i'$  と実物水車の効率  $\eta_i$  はそれぞれ

$$\eta_i' = 1 - \frac{\Sigma h_i'}{H_i'} \quad \eta_i = 1 - \frac{\Sigma h_i}{H_i}$$

したがって、

$$1 - \eta_i' = \frac{\Sigma h_i'}{H_i'} = \Sigma h_{1i}' \quad 1 - \eta_i = \frac{\Sigma h_i}{H_i} = \Sigma h_{1i}$$

ゆえに、

$$\frac{1 - \eta_i}{1 - \eta_i'} = \frac{\Sigma h_{1i}}{\Sigma h_{1i}'} \quad \eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \frac{\Sigma h_{1i}}{\Sigma h_{1i}'} \dots \dots \dots (36)$$

ここに、 $\Sigma h_{1i}/\Sigma h_{1i}'$  は効率の換算率を示すこととなる。

実物水車の全損失  $\Sigma h_{1i}$  は(33)~(35)式にまとめたように種々の性質の損失の総和からなっており、一般に、次式で表わされる。

$$\Sigma h_{1i} = h_{1ii} + h_{1iii} + h_{1iiii} + h_{1ivi} + \dots \dots \dots (37)$$

同様にして、模型水車では  $\Sigma h_{1i}'$  は

$$\Sigma h_{1i}' = h_{1ii}' + h_{1iii}' + h_{1iiii}' + h_{1ivi}' + \dots \dots \dots (37)'$$

いま、模型と実物が相似にできた相互の水車について、同一性質の損失の割合を次のように  $M_1, M_2, M_3, \dots$  とし、

$$\frac{h_{1ii}}{h_{1ii}'} = M_1, \quad \frac{h_{1iii}}{h_{1iii}'} = M_2, \quad \frac{h_{1iiii}}{h_{1iiii}'} = M_3, \dots \dots \dots (38)$$

また、模型水車の全損失  $\Sigma h_{1i}'$  に対する各種の性質の損失が占める割合を次のように  $S_1, S_2, S_3, \dots$  と記号すれば

$$\frac{h_{1ii}'}{\Sigma h_{1i}'} = S_1, \quad \frac{h_{1iii}'}{\Sigma h_{1i}'} = S_2, \quad \frac{h_{1iiii}'}{\Sigma h_{1i}'} = S_3, \dots \dots \dots (39)$$

換算率  $\Sigma h_{1i}/\Sigma h_{1i}'$  は次のようにかきかえられる。

$$\frac{\Sigma h_{1i}}{\Sigma h_{1i}'} = M_1 S_1 + M_2 S_2 + M_3 S_3 + \dots \dots \dots (40)$$

いま、前章で解析の結果求めた各種の全損失  $\Sigma h_{1Fi}, \Sigma h_{1Pi}$  および  $\Sigma h_{1Ki}$  を用いて、実物水車と模型水車に関する(37)および(37)'式をかき、この両式から(38)式に示す  $M_1, M_2, M_3, \dots$  を求めてみる。

相互に幾何学的に相似にできた大小2個の水車においては、それぞれの水車の構造寸法など物理的諸元の割合から一義的に定まる係数  $K_{F1}, K_{F2}, \dots, K_{P1}, K_{P2}, \dots, K_{K1}, K_{K2}, \dots$  などに関しては

$$\begin{aligned}
 \frac{K_{F1}}{K_{F1}'} & = \frac{K_{F2}}{K_{F2}'} = \dots = \frac{K_{P1}}{K_{P1}'} = \frac{K_{P2}}{K_{P2}'} \\
 & = \dots = \frac{K_{K1}}{K_{K1}'} = \frac{K_{K2}}{K_{K2}'} = \dots = 1 \dots \dots \dots (41)
 \end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned}
 \frac{\Sigma \frac{l}{m}}{\Sigma \frac{l'}{m'}} & = 1, \quad \frac{V_i^2}{2gH_i} = \frac{V_i'^2}{2gH_i'} \quad \text{または} \quad \frac{V_{1i}^2}{2g} = \frac{V_{1i}'^2}{2g} \\
 & \dots \dots \dots (42)
 \end{aligned}$$

なる関係にあることを考慮して、水車の種類別に  $M_1, M_2, \dots$  を求めると、

(1) フランス水車では(33)式から

$$\begin{aligned}
 M_{F1} & = \frac{\lambda}{\lambda'}, \quad M_{F2} = \frac{\lambda(n-1)^2}{\lambda'(n'-1)^2}, \quad M_{F3} = \frac{f}{f'} \\
 M_{F4} & = \frac{f(nq - \gamma_{R1})^2}{f'(n'q' - \gamma_{R1}')^2}, \quad M_{F5} = \frac{(nq - \gamma_{R2})^2}{(n'q' - \gamma_{R2}')^2} \\
 M_{F6} & = \frac{(n-1)^2 q^2}{(n'-1)^2 q'^2}, \quad M_{F7} = \frac{q^2}{q'^2}, \quad M_{F8} = 1 \\
 M_{F9} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2 \frac{f}{f'} \\
 M_{F10} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2 \\
 M_{F11} & = \left( \frac{L_{1mi}}{L_{1mi}'} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{L_{1i}'}{L_{1i}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{f}{f'} \right)^{\frac{1}{3}}
 \end{aligned} \dots \dots \dots (43)$$

(2) プロペラ水車では(34)式から

$$\begin{aligned}
 M_{P1} & = \frac{\lambda}{\lambda'}, \quad M_{P2} = \frac{\lambda(n-1)^2}{\lambda'(n'-1)^2}, \quad M_{P3} = \frac{f}{f'} \\
 M_{P4} & = \frac{f(nq - \gamma_{R1})^2}{f'(n'q' - \gamma_{R1}')^2}, \quad M_{P5} = \frac{(nq - \gamma_{R2})^2}{(n'q' - \gamma_{R2}')^2} \\
 M_{P6} & = \frac{(n-1)^2 q^2}{(n'-1)^2 q'^2}, \quad M_{P7} = \frac{q^2}{q'^2}, \quad M_{P8} = 1 \\
 M_{P9} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2 \frac{f}{f'} \\
 M_{P10} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2
 \end{aligned} \dots \dots \dots (44)$$

(3) カプラン水車では(35)式から

$$\begin{aligned}
 M_{K1} & = \frac{\lambda}{\lambda'}, \quad M_{K2} = \frac{\lambda(n-1)^2 q^2}{\lambda'(n'-1)^2 q'^2}, \quad M_{K3} = \frac{f}{f'} \\
 M_{K4} & = \frac{(n-1)^2 q^2}{(n'-1)^2 q'^2}, \quad M_{K5} = \frac{q^2}{q'^2}, \quad M_{K6} = 1 \\
 M_{K7} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2 \frac{f}{f'} \\
 M_{K8} & = \left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 \left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2
 \end{aligned} \dots \dots \dots (45)$$

となる。いま、(43)~(45) 式に含まれる諸項を整理して、 $\lambda/\lambda'$ ,  $f/f'$ ,  $(q/q')^2$ ,  $(n-1)^2/(n'-1)^2$ ,  $(nq-\gamma)^2/(n'q'-\gamma')^2$ ,  $(Q_{1vi}/Q_{1vi'})^3$ ,  $(Q_{1i}'/Q_{1i})^3$ ,  $(N_{1i}/N_{1i}')^2$ ,  $(L_{1mi}/L_{1mi'})^{2/3}$ ,  $(L_{1i}'/L_{1i})^{2/3}$  なる 10 項について、その相似性を検討する。

(a)  $\lambda/\lambda'$ ,  $f/f'$  の相似性

$\lambda$ ,  $f$  はそれぞれ管路および平板の表面摩擦損失係数であって、いずれもレイノルズ数 ( $R_e$  数) の関数で、最も一般的に  $R_e$  数の  $1/5$  乗に逆比例するものとおくと、

$$\lambda = \text{const } R_e^{-1/5}, \quad f = \text{const } R_e^{-1/5}$$

したがって、

$$\lambda = \text{const } D^{-1/5}, \quad f = \text{const } D^{-1/5}$$

なる関係にあり

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{f}{f'} = \left(\frac{D'}{D}\right)^{1/5} \quad \dots\dots\dots (46)$$

(b)  $(q/q')^2$  の相似性

(8) 式の関係を用いてかきかえると

$$\left(\frac{q}{q'}\right)^2 = \left(\frac{Q_{1s}}{Q_{1s}'}\right)^2 \left(\frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (47)$$

さて、流量  $Q$  と回転数  $N$  と大きさ  $D$  の間には一般に次の相似関係がある。

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{N}{N'} \left(\frac{D}{D'}\right)^3 \quad \dots\dots\dots (48)$$

したがって、

$$\frac{Q_{1i}}{Q_{1i}'} = \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \left(\frac{D}{D'}\right)^3 \quad \dots\dots\dots (48)'$$

現行の模型試験法では

$$\frac{N}{N'} = \left(\frac{H}{H'}\right)^{1/2} \left(\frac{D'}{D}\right) \quad \dots\dots\dots (49)$$

を満足するよう模型水車の回転数  $N'$  を定めている。したがって、実物水車と模型水車がともに最高効率を示す点においては

$$\frac{N_s}{N_s'} = \left(\frac{H_s}{H_s'}\right)^{1/2} \left(\frac{D'}{D}\right) \quad \dots\dots\dots (49)'$$

となる。それゆえに、書き換えると

$$\frac{N_{1s}}{N_{1s}'} = \frac{D'}{D} \quad \dots\dots\dots (49)''$$

となる。(48)' 式に (49)'' の関係を用いると

$$\frac{Q_{1s}}{Q_{1s}'} = \frac{N_{1s}}{N_{1s}'} \left(\frac{D}{D'}\right)^3 = \left(\frac{D}{D'}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (50)$$

いま、(49)'' 式を満足する相似な運転状態から、ガイドベーン開度  $\Delta g$  のみを変えると、部分負荷運転時には模型と実物水車の流量比  $Q_{1p}'/Q_{1p}$  は

$$\frac{Q_{1p}'}{Q_{1p}} = \frac{\left(\frac{\Delta g_i'}{\Delta g_s'}\right) Q_{1s}'}{\left(\frac{\Delta g_i}{\Delta g_s}\right) Q_{1s}} \quad \dots\dots\dots (51)$$

$\Delta g_i'/\Delta g_s'$  と  $\Delta g_i/\Delta g_s$  は模型水車と実物水車の最高効率を示すガイドベーン開度  $\Delta g_s'$ ,  $\Delta g_s$  と、その他の任意の開度  $\Delta g_i'$ ,  $\Delta g_i$  の比であるから、相似にできた 2 台の水車では  $\Delta g_i'/\Delta g_s' = \Delta g_i/\Delta g_s$  となつて、(51) 式は

$$\frac{Q_{1p}'}{Q_{1p}} = \frac{Q_{1s}'}{Q_{1s}}$$

したがって、(50) 式から

$$\frac{Q_{1p}'}{Q_{1p}} = \left(\frac{D'}{D}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (51)'$$

次に、最高効率を示す以外の任意の落差での運転にあつては

$$Q_{1i} = Q_{1p} \frac{N_{1i}}{N_{1s}}, \quad Q_{1i}' = Q_{1p}' \frac{N_{1i}'}{N_{1s}'}$$

となることから

$$\frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} = \frac{Q_{1p}' \left(\frac{N_{1i}'}{N_{1s}'}\right)}{Q_{1p} \left(\frac{N_{1i}}{N_{1s}}\right)} = \left(\frac{Q_{1p}'}{Q_{1p}}\right) \left(\frac{N_{1i}'}{N_{1i}}\right) \left(\frac{N_{1s}}{N_{1s}'}\right) \quad \dots\dots\dots (52)$$

ここで、

$$N_{1i}' = \frac{N_i'}{\sqrt{H_i'}}, \quad N_{1i} = \frac{N_i}{\sqrt{H_i}}$$

であるから

$$\frac{N_{1i}'}{N_{1i}} = \frac{N_i'}{N_i} \left(\frac{H_i}{H_i'}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (53)$$

また、実物水車では  $N_i = N_s = \text{const}$ , 模型試験では  $H_i' = H_s' = \text{const}$  なることから、(53) 式は

$$\frac{N_{1i}'}{N_{1i}} = \frac{N_i'}{N_s} \left(\frac{H_i}{H_s'}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (53)'$$

さらに、模型試験法では  $N_i'$  は (49) 式の関係を用いて

$$N_i' = N_s \left(\frac{D}{D'}\right) \left(\frac{H_i'}{H_i}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (54)$$

と定めているから、 $H_i' = H_s' = \text{const}$  の関係を用いて書き換え

$$N_i' = N_s \left(\frac{D}{D'}\right) \left(\frac{H_s'}{H_i}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (54)'$$

(53)' 式に (54)' 式の関係を代入すると

$$\frac{N_{1i}'}{N_{1i}} = \frac{N_s \left(\frac{D}{D'}\right) \left(\frac{H_s'}{H_i}\right)^{1/2}}{N_s} \cdot \left(\frac{H_i}{H_s'}\right)^{1/2} = \left(\frac{D}{D'}\right) \quad \dots\dots\dots (53)''$$

(52) 式に (49)'', (51)' および (53)'' の諸式を代入すると

$$\frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} = \left(\frac{D'}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{D'}\right) \left(\frac{D'}{D}\right) = \left(\frac{D'}{D}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (52)'$$

さらに、(47) 式に (50) と (52)' の両式の関係を用いて

$$\left(\frac{q}{q'}\right)^2 = \left(\frac{D}{D'}\right)^4 \cdot \left(\frac{D'}{D}\right)^4 = 1 \quad \dots\dots\dots (47)''$$

となる。

(c)  $(n-1)^2/(n'-1)^2$  の相似性

$n, n'$  を (13) 式の関係を用いて書き換える。

$$\frac{(n-1)^2}{(n'-1)^2} = \frac{\left(\frac{N_{1i}}{N_{1s}} - 1\right)^2}{\left(\frac{N_{1i}'}{N_{1s}'} - 1\right)^2} = \left(\frac{N_{1i} - N_{1s}}{N_{1i}' - N_{1s}'}\right)^2 \left(\frac{N_{1s}'}{N_{1s}}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (55)$$

ここに、実物水車では  $N_i = N_s = \text{const}$  なることから

$$N_{1i} - N_{1s} = N_s \left(\frac{1}{\sqrt{H_i}} - \frac{1}{\sqrt{H_s}}\right) \quad \dots\dots\dots (56)$$

また、模型試験では  $N_i'$  が (54)' 式で示すように定められることから

$$N_{1i}' - N_{1s}' = N_s \left(\frac{D}{D'}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{H_i}} - \frac{1}{\sqrt{H_s}}\right) \quad \dots\dots\dots (57)$$

(49)'', (56) および (57) の諸式を用いて (55) 式を書き換えると

$$\frac{(n-1)^2}{(n'-1)^2} = \left(\frac{D'}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{D'}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (55)'$$

(d)  $(nq-\gamma)^2/(n'q'-\gamma')^2$  の相似性

$n, n'$  を (13) 式で,  $q, q'$  を (8) 式で書き換え, さらに,  $\gamma, \gamma'$  はラ  
ンナの入口速度三角形からきまる関数で, それぞれ  $\gamma \propto u_{1i}/u_{1s} \propto$   
 $N_{1i}/N_{1s}, \gamma' \propto \{(u_{1i}'-u_{1s}')/u_{1s}'\}(v_{1s}'/v_{1i}') \propto \{(N_{1i}'-N_{1s}')/N_{1s}'\}(Q_{1s}'/$   
 $Q_{1i}')$  なる関係にあることを考慮して, 書き換え整理すると

$$\frac{(nq-\gamma)^2}{(n'q'-\gamma')^2} = \frac{\left\{ \left( \frac{N_{1i}}{N_{1s}} \right) \left( \frac{Q_{1s}}{Q_{1i}} \right) - \left( \frac{N_{1i}'}{N_{1s}'} \right) \right\}^2}{\left\{ \left( \frac{N_{1i}'}{N_{1s}'} \right) \left( \frac{Q_{1s}'}{Q_{1i}' } \right) - \left( \frac{N_{1i}'-N_{1s}'}{N_{1s}'} \right) \left( \frac{Q_{1s}'}{Q_{1i}' } \right) \right\}^2}$$

$$= \frac{\left( \frac{N_{1i}}{N_{1s}} \right)^2 \left\{ \left( \frac{Q_{1s}}{Q_{1i}} \right) - 1 \right\}^2}{\left( \frac{Q_{1s}'}{Q_{1i}' } \right)^2 \left\{ \left( \frac{N_{1i}'}{N_{1s}'} \right) - \left( \frac{N_{1i}'-N_{1s}'}{N_{1s}'} \right) \right\}^2}$$

..... (58)

ここに, 実物水車では  $N_i = N_s = \text{const}$  なることから

$$\frac{N_{1i}}{N_{1s}} = \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

また, (50) と (52)' 式から

$$\frac{Q_{1i}'}{Q_{1s}'} = \frac{Q_{1i}}{Q_{1s}}$$

さらに,

$$\frac{Q_{1i}}{Q_{1s}} = \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

なることから, (58) 式は

$$\frac{(nq-\gamma)^2}{(n'q'-\gamma')^2} = \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) \dots \dots \dots (58)'$$

となる。

(e)  $(Q_{1vi}/Q_{1vi}')^3$  の相似性

$Q_{1vi}/Q_{1vi}'$  を (19)' 式の関係を用いて書くと

$$\frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} = \frac{A_v \cdot \frac{\cos \delta_{vi}}{\sqrt{f \frac{l_v}{m_v} + \zeta_v + 1}} \cdot \sqrt{2gh_{1vi}}}{A_v' \cdot \frac{\cos \delta_{vi}'}{\sqrt{f' \frac{l_v'}{m_v'} + \zeta_v' + 1}} \cdot \sqrt{2gh_{1vi}'}} \dots \dots \dots (59)$$

ここに,

$$\frac{A_v}{A_v'} = \left( \frac{D}{D'} \right)^2, \quad \frac{\cos \delta_{vi}}{\cos \delta_{vi}'} = \frac{N_{1i}}{N_{1i}'}, \quad \frac{h_{1vi}}{h_{1vi}'} = \frac{H_i}{H_i'}$$

なる関係があり, また,

$$f \frac{l_v}{m_v} \ll \zeta_v + 1, \quad f' \frac{l_v'}{m_v'} \ll \zeta_v' + 1$$

であるから

$$\frac{\sqrt{f' \frac{l_v'}{m_v'} + \zeta_v' + 1}}{\sqrt{f \frac{l_v}{m_v} + \zeta_v + 1}} \doteq 1$$

とにおいて, (59) 式を書き換えると

$$\frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} = \left( \frac{D}{D'} \right)^2 \left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right) \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (59)'$$

となる。さらに,  $N_{1i}/N_{1i}'$  は (53)'' 式の関係にあるから

$$\frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} = \left( \frac{D}{D'} \right) \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (59)''$$

したがって,

$$\left( \frac{Q_{1vi}}{Q_{1vi}'} \right)^3 = \left( \frac{D}{D'} \right)^3 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (60)$$

となる。

(f)  $(Q_{1i}'/Q_{1i})^3$  の相似性

(52)' 式の関係から

$$\left( \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \right)^3 = \left( \frac{D'}{D} \right)^6 \dots \dots \dots (61)$$

(g)  $(N_{1i}/N_{1i}')^2$  の相似性

(53)'' 式の関係から

$$\left( \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \right)^2 = \left( \frac{D'}{D} \right)^2 \dots \dots \dots (62)$$

(h)  $(L_{1mi}/L_{1mi}')^{2/3}$  の相似性

$L_{1mi}/L_{1mi}'$  を (27)' 式の関係を用いて書くと

$$\frac{L_{1mi}}{L_{1mi}'} = \frac{1}{102.04} \cdot u_{2i} \left( \frac{4}{5} A_1 + \frac{1}{2} A_2 \right) \gamma h_{1mi}^I$$

$$\frac{L_{1mi}'}{L_{1mi}'} = \frac{1}{102.04} \cdot u_{2i}' \left( \frac{4}{5} A_1' + \frac{1}{2} A_2' \right) \gamma h_{1mi}^I$$

..... (63)

ここに,

$$\frac{u_{2i}}{u_{2i}'} = \frac{N_i}{N_i'} = \frac{N_{1i}}{N_{1i}'} \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{D'}{D} \right) \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\frac{4}{5} A_1 + \frac{1}{2} A_2}{\frac{4}{5} A_1' + \frac{1}{2} A_2'} = \left( \frac{D}{D'} \right)^2, \quad \frac{h_{1mi}^I}{h_{1mi}^I'} = \frac{H_i}{H_i'}$$

となるから, (63) 式は

$$\frac{L_{1mi}}{L_{1mi}'} = \left( \frac{D'}{D} \right) \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{D}{D'} \right)^2 \cdot \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)$$

$$= \left( \frac{D}{D'} \right) \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (63)'$$

したがって,

$$\left( \frac{L_{1mi}}{L_{1mi}'} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{D}{D'} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{H_i}{H_i'} \right) \dots \dots \dots (64)$$

(i)  $(L_{1i}'/L_{1i})^{2/3}$  の相似性

$L_{1i}'/L_{1i}$  を (28) 式の関係を用いて書くと

$$\frac{L_{1i}'}{L_{1i}} = \frac{1}{102.04} \cdot \gamma Q_{1i}' = \frac{Q_{1i}'}{Q_{1i}} \dots \dots \dots (65)$$

(52)' 式の関係を用いて書き換えると

$$\frac{L_{1i}'}{L_{1i}} = \left( \frac{D'}{D} \right)^2 \dots \dots \dots (65)'$$

したがって

$$\left( \frac{L_{1i}'}{L_{1i}} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{4}{3}} \dots \dots \dots (66)$$

となる。以上検討してきた (a)~(i) の諸相似性をとり入れて  
(43)~(45) 式の  $M_{F1}, M_{F2}, \dots, M_{P1}, M_{P2}, \dots, M_{K1}, M_{K2}, \dots$  を求  
めて, 第 2 章で求めた各種水車の全損失を示す式 (33)~(35) 式を  
使って全損失を換算する効率換算の基本式を導くと

(1) フランシス水車では

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \left[ \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left\{ S_1 + S_2 + S_3 \right. \right.$$

$$\left. + \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) S_4 \right]$$

$$+ \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) S_5$$

$$+ S_6 + S_7 + S_8 + \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_9$$

$$+ \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_{10} + \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{15}} \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{H_i}{H_i'} \right) S_{11} \left. \right]$$

..... (67)

(2) プロペラ水車では

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \left\{ \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left[ S_1 + S_2 + S_3 + \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) S_4 \right] + \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_9 + \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_{10} \right\} \dots (68)$$

(3) カプラン水車では

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \left\{ \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} (S_1 + S_2 + S_3) + S_4 + S_5 + S_6 + \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_7 + \left( \frac{D'}{D} \right)^5 \left( \frac{H_i}{H_i'} \right)^{\frac{3}{2}} S_8 \right\} \dots (69)$$

となる。ここに、 $S_1, S_2, S_3, \dots$ は水車の種類により、また、同一種類の水車でも特有速度  $n_s$  の相違によってその大きさが異なり、個々の水車についての厳密な効率の換算は容易でない。そこで、実験結果をもとにして  $S_1, S_2, S_3, \dots$  の大きさを検討吟味して、同一性質の損失を一括して整理し、全損失中で諸摩擦損失の和が占める割合を  $X$  とすれば、フランス水車に関しては

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \left\{ X \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{Q_i}{Q_s} \right) \left( \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \left( \frac{H_s}{H_i} \right) \right] + (X - 1) \right\} \dots (70)$$

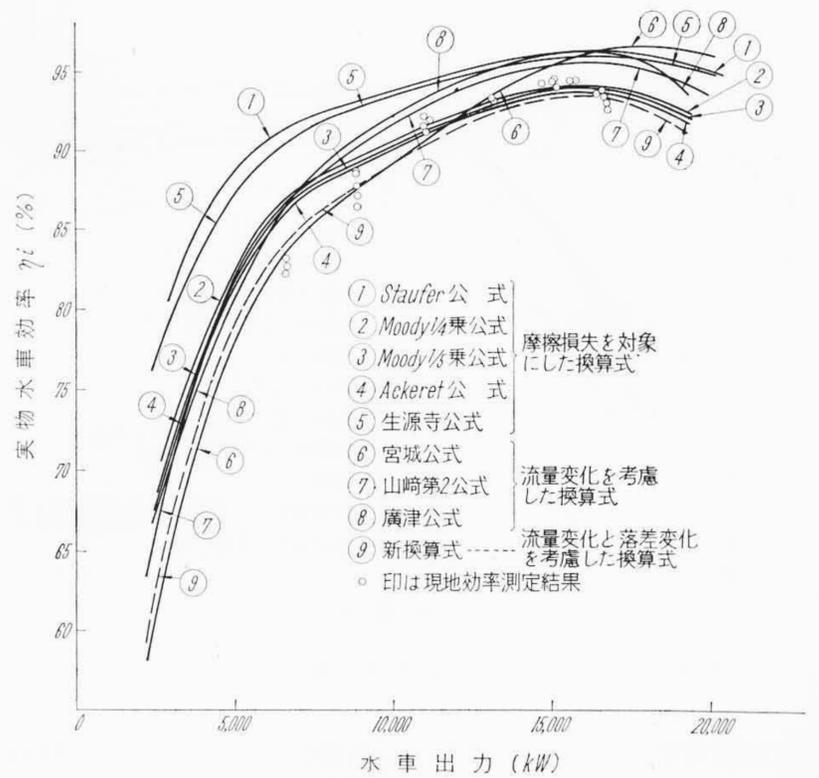
カプラン水車に関しては

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_i') \left\{ X \left( \frac{D'}{D} \right)^{\frac{1}{5}} + (X - 1) \right\} \dots (71)$$

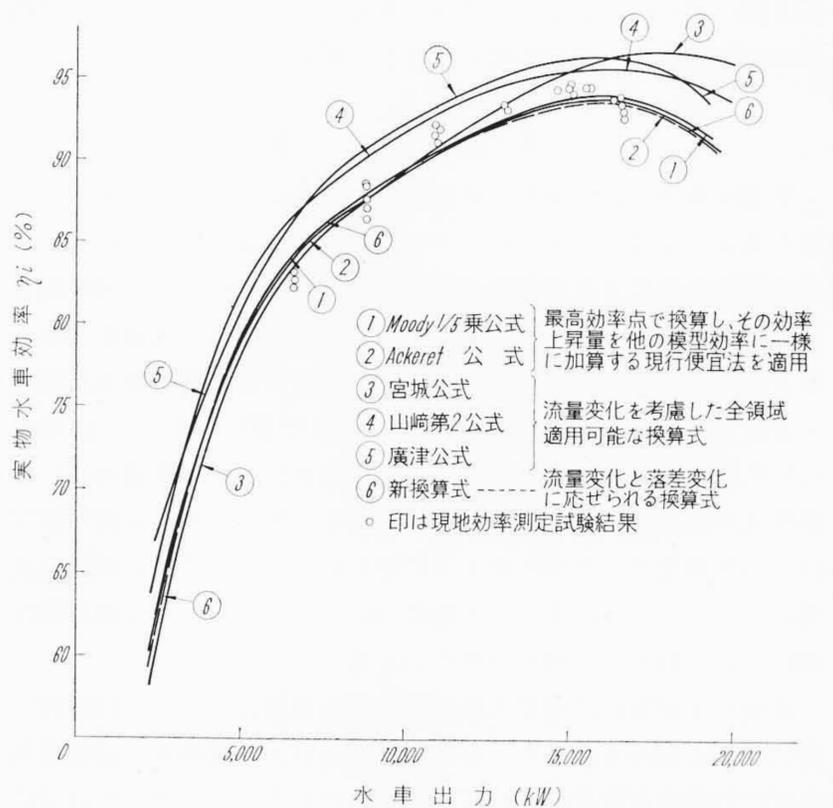
と簡単化する。ここに、 $X$ はフランス水車で $\frac{4}{5}$ 、カプラン水車では特有速度  $n_s$  の値が大きくなるにつれて $\frac{3}{5} \sim \frac{2}{5}$ と変化する。固定羽根ランナの水車と可動羽根ランナの水車では、その損失の性質および損失構成が大幅に異なり、(70)式と(71)式で示すように異なった二つの別々な換算式として表現される。

#### 4. 新効率換算式と既発表の諸公式との対比および近似性の検討

既発表の多数の諸換算式の中から代表的な数式をとりあげ、新換算式と実験例に照らして、その合致性を検討してみる。フランス水車の一実例として、最大出力 15,450 kW、基準落差 50 m、最大水量 34.8 m<sup>3</sup>/s を基準状態として計画された水車について、1/4.3 に縮尺して造った模型水車の試験の結果を用いて、この水車が基準の落差から著しく偏した 54~55 m の落差で試験された実物水車の結果と対比し、比較換算すると第1図に示すようになる。ここにとりあげた Moody の 1/5 乗公式と Ackeret 公式はともに広く一般に信頼され、使用されてきているが、これらは周知のように、水車が最高効率を示す点以外では効率を高く評価する。また、Staufer 公式や生源寺公式などは摩擦公式を特異としているが、最高効率および部分負荷運転時の効率をともに比較的高く算出する。さらに、部分負荷運転時の流量変化をも含めて考案された宮城公式、山崎公式および広津公式はいずれも最高効率が高く評価される。これらすべての換算式はともに偏落差運転時に対する考慮が格別払われていない。そこで、流量変化をとり入れていない Moody の 1/5 乗公式と Ackeret 公式などの諸式については現在、便宜法として広く一般に慣用されている落差に関係なく水車が最高効率を示す点で換算式を



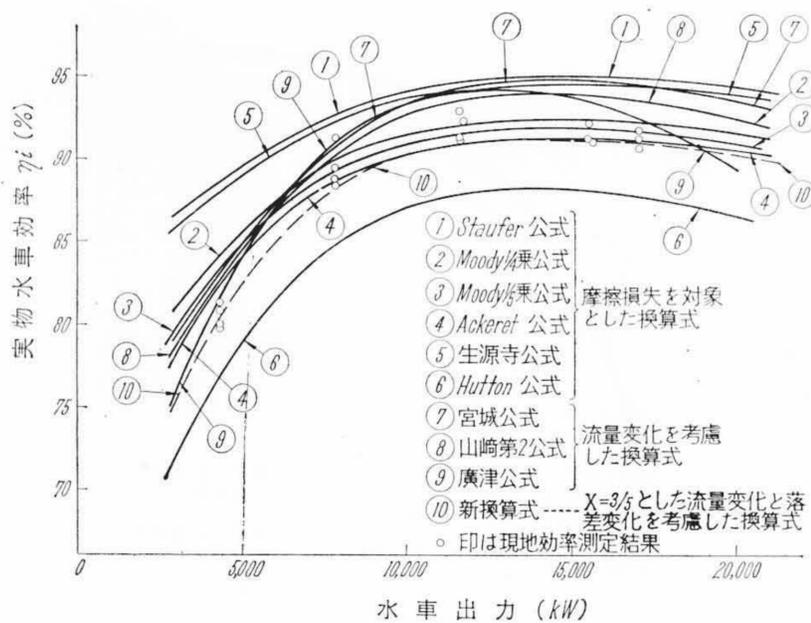
第1図 フランス水車に関する換算式比較の一実例



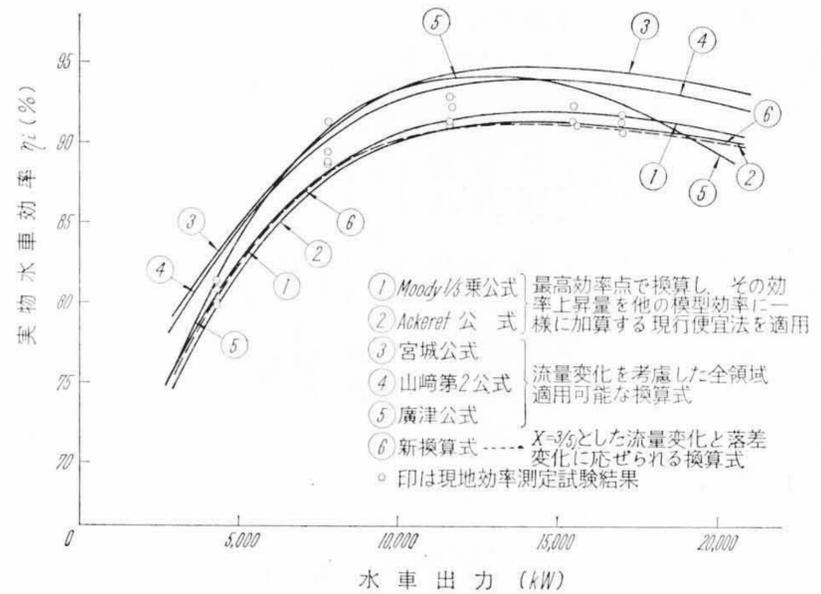
第2図 フランス水車に関する現行便宜法による換算との比較

用いて換算し、その効率の上昇量を他のすべての模型効率に一律に加算する方法（この方法を現行便宜法と略称する）を適用して実物水車の効率を推定換算し、これと流量変化をとり入れた宮城公式、山崎公式および広津公式による換算結果を新換算式による値と対比すると、第2図のようになって、新換算式は実物水車の試験結果とよく合致している。また、Moody 1/5 乗公式や Ackeret 公式を用いた現行便宜法も、合理性に欠けていながらよく実物水車の実測効率値に近い値を示している。この事実は現行便宜法が意外に賞用されている一因ともいえるであろう。

次に、カプラン水車について、最大出力 15,800 kW、基準落差 60 m、水量 24.64 m<sup>3</sup>/s を基準状態として計画された水車に関し、1/4.3 縮尺の模型水車の試験結果を用いて、基準落差から著しく偏した 72~73 m 落差で行なった実物水車の現地試験結果と対比し、(71)式に  $X = \frac{3}{5}$  とおいて比較換算すると第3図のようになる。カプラン水車ではランナ角度とガイドベーン開度を連動し、ランナに衝撃損失の生じないように運転されるから Moody 1/5 乗公式や Ackeret



第 3 図 カプラン水車に関する換算式比較の一实例



第 4 図 カプラン水車に関する現行便宜法による換算との比較

公式は新換算式とともに比較的よい合致性を示す。さらに、Moody 1/5 乗公式と Akeret 公式に現行便宜法を適用し、これと流量変化をとり入れた宮城公式、山崎公式および広津公式と対比してみると第 4 図に見られるようにカプラン水車に関する新換算式が全負荷領域にわたりすぐれた合致性を示すことがわかる。

### 5. 結 言

筆者は水車の損失解析の結果から全損失を対象とした水車効率換算の基本式を導き、さらに、その主要損失を対象に簡易化して、損失の構成を異にする異種類の水車に別々な形の実用的な効率換算式を導出した。この大胆に簡易化した諸式が、落差と流量がその基準値より偏した任意の運転条件下においても、よく現地効率試験結果と合致することを実証し得た。また一般に慣用されている Moody 1/5 乗公式や Akeret 公式を用いた現行便宜法が、筆者の導いた新換算式の計算値に近い事実から、合理性は無いながらも広く賞用されている現況がうなずけるように思われる。ここに、効率換算式の導出の方法を主体に述べ、各種の  $n_s$  の水車については具体的な事例について詳述する機会を得たいと考えている。

最後に本研究には東京工業大学の板谷教授ならびに草間教授のご懇切なるご指導を賜わり、日立製作所日立工場深栖水力設計部長ならびに外岡水車設計課長のご支援をいただき、日立製作所日立研究所山崎第三部長のご指導を仰いだ。これら各位のご力添えに深甚の謝意を表わす次第である。

### 参 考 文 献

- (1) R. Camerer: Z. V. D. I., 1909 a  
R. Camerer: Vorlesungen über Wasserkraft Maschinen 2nd Editon., 1924
- (2) Hütte: Das Ing. Taschenbuch II., 1926
- (3) F. Staufers: Z. V. D. I. Bd. 26, No. 13, March. 28 th., 1925  
F. Staufers: Wasserkraft u. Wasserwirtschaft
- (4) L. F. Moody: Proc. A. S. C. E. August., 1925
- (5) L. F. Moody: Mechanical Engineering., 1935  
L. F. Moody: Trans. of A. S. M. E.. Vol. 57, 1935
- (6) Handbook of Applied Hydraulics., 1942
- (7) C. Haeger: Wasserkraft u. Wasserwirtschaft., Bd. 7, 1927
- (8) F. Oesterlen: Z. V. D. I., Bd. 72
- (9) C. Pfeleiderer: Die Wasserturbine., 1947
- (10) J. Akeret: Escher-Wyss News., Vol. 4, 1931
- (11) S.P.Hutton: Proc of Institution of Mechanical Engineer, Vol. 168, 1954
- (12) 生源寺: 水タービン
- (13) 宮城: 機学論文集, 3 卷, 昭 12
- (14) 山崎: 日立評論 27, 41 (昭 19-5)
- (15) 山崎: 日立評論 29, 129 (昭 22-12)
- (16) 淵沢: 東北大学高速力学研究所報告, 5 卷 48 号, 昭 26
- (17) 広津: 機学会誌, 53 卷 381 号, 昭 25  
広津: 機学会誌, 54 卷 390 号, 昭 26  
広津: 機学会誌, 54 卷 391 号, 昭 26
- (18) 板谷, 手島, 西川: 機学 39 期総会講演会前刷, No. 412, 昭 36
- (19) 小森谷, 羽鳥: 日立評論 22, 259 (昭 17-5)
- (20) 山崎, 手島: 日立評論 36, 717 (昭 29-4)

### 訂 正

本誌第 44 卷第 10 号掲載「TO-H プラントについて」の論文中に下記の如く誤りがありましたので訂正いたします。

### 記

訂 正 個 所	訂 正
1623 頁 第 1 図 図 面	1627 頁 第 11 図 図 面 を 入 れ る
1627 頁 第 11 図 図 面	1623 頁 第 1 図 図 面 を 入 れ る