

# 調圧水槽の水力計算について

正 員 脇 治 雄\*

## TREATISE ON HYDRAULIC CALCULATION OF SURGE TANK

(JSCE Oct. 1954)

Haruo Waki, C.E. Member

**Synopsis** The restricted orifice surge tank with chambers is proposed as a standard type to be economically and generally used, and the necessary hydraulic formulas for designing it are shown here. Each form and hydraulic formula for other types of surge tank is derived from the general one above stated, and so in this paper it is aimed to generalize types and hydraulic calculations of all surge tanks.

**要旨** 水室付制水孔調圧水槽を調圧水槽の標準型として提案し、これが設計に必要な水力計算式を示す。

他の各種調圧水槽の形状並びに水力計算式は上述のものから変形誘導される。これにより、本文では調圧水槽の形状並びに水力計算式の普遍化を意図した。

### I 使用記号

一般記号

$H_0$ : 総落差 (m)

$H_n$ : 有効落差 (m)

$z$ : 取水口水位を基準とした水槽水位 (m)

水槽水位が取水口水位より下方にあるとき正, 上方にあるとき負 (m)

$z_0$ : 最大負荷定常時水槽水位 (m),  $z_0 = h_0$

$z_{max}$ : 極限水槽水位,  $z$  の最大値 (m)

$z_k$ : 上段水室数, 下段水室天端の  $z$  値 (m),

$$z_k = h_k$$

$h$ : 圧力トンネル内損失落差 (m),  $h = \alpha \cdot v^2$

$h_0 = \alpha \cdot v_0^2$ : 全負荷定常時圧力トンネル内損失落差 (m)

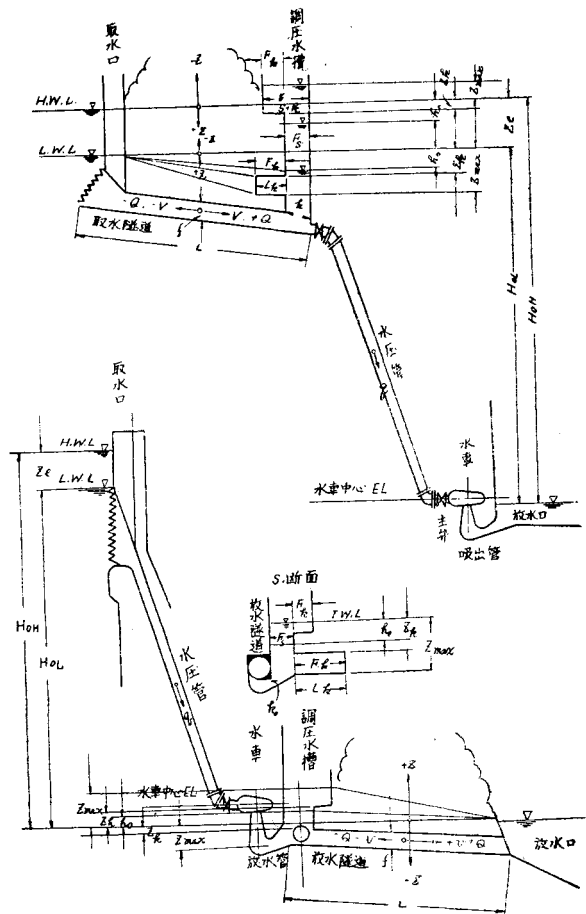
$\alpha = \frac{h}{v^2}$ : 圧力トンネル内損失落差係数と仮称

$k$ : 制水孔損失水頭 (m),

$$k = \alpha_1 \cdot v^2 = \alpha_1 \cdot \left( \frac{F}{f} \cdot \frac{dz}{dt} \right)^2$$

$k_0$ : 最大使用水量  $q_0 = Q_0$  を流したときの制水孔損失水頭 (m)

図-1 使用記号説明図



\* 日本産業再建技術協会

- $h_0 = \alpha_1 \cdot v_0^2 = \frac{\alpha_1}{\alpha} \cdot h_0 = c^2 \cdot h_0$   
 $\alpha_1 = \frac{k_0}{v_0^2}$  : 制水孔損失水頭係数と仮称  
 $c^2 = \frac{k_0}{h_0}$  : 制水孔係数と仮称  
 $q$  : 使用水量 (m<sup>3</sup>/sec)  
 $Q$  : トンネル内流量 (m<sup>3</sup>/sec), 調圧水槽に向つて流れるとき正, 取水口に向つて逆流するとき負  
 $q_0 = Q_0$  : 最大使用水量 (m<sup>3</sup>/sec)  
 $v$  : トンネル内平均流速 (m/sec),  $v = \frac{Q}{f}$ , 調圧水槽に向つて流れるとき正, 取水口に向つて逆流するとき負  
 $v_0$  : 最大使用量  $q_0 = Q_0$  が流れるときのトンネル内平均流速 (m/sec)  
 $L$  : トンネル長 (m)  
 $f$  : トンネル断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $F$  : 調圧水槽水平面積 (m<sup>2</sup>)  
 $F_1$  : 等断面理想調圧水槽水平面積 (m<sup>2</sup>)  
 $F_2$  : 等断面単動調圧水槽水平面積 (m<sup>2</sup>)  
 $V$  : 調圧水槽容積 (m<sup>3</sup>)  
 $F, V$  がライザー, 水室に区別される場合にはそれぞれ添字  $s, k$  を附して表わす。  
 $t$  : 時間 (sec)  
 $g$  : 重力の加速度 (m/sec<sup>2</sup>)  
 $C$  : 水量と落差との相乗積で表わした出力 (m<sup>3</sup>/sec·m)

比値記号

- $\beta = \frac{h_0}{H_0}$  : 総落差  
 $x = \frac{z}{h_0} \cdot x_{\max} = \frac{z_{\max}}{h_0}$  : 水槽水位  
 $x_k = \frac{z_k}{h_0} = \frac{h_k}{h_0}$  : 上段水室敷, 下段水室天端の  $x$  値  
 $y = \frac{Q}{Q_0} = \frac{v}{v_0}$  : トンネル内流量または流速  
 $x_1 = y_0^2 = 1$   
 $c^2 = \frac{k_0}{h_0} = \frac{\alpha_1}{\alpha}$  : 制水孔係数  
 $\epsilon_F = \frac{F}{L \cdot f \cdot v_0^2} = \frac{g \cdot F \cdot h_0^2}{L \cdot f \cdot v_0^2}$   
 $= \frac{\alpha \cdot g \cdot F}{L \cdot f} \cdot h_0$  : 水槽面積

- $\epsilon_{F_1}, \epsilon_{F_2}$  : それぞれ等断面理想単動調圧水槽面積  
 $\epsilon_V = \frac{V}{L \cdot f \cdot v_0^2} = \frac{g \cdot V \cdot h_0}{L \cdot f \cdot v_0^2} = \frac{\alpha \cdot g \cdot V}{L \cdot f}$  : 水槽容積

$\epsilon_F, \epsilon_V$  がライザー, 水室に区別される場合にはそれぞれ添字  $s, k$  を附して表わす。

$T = \frac{t}{L \cdot v_0} = \frac{g \cdot h_0 \cdot t}{L \cdot v_0}$  : 時間  
 $g \cdot h_0$

以上比値記号の分母は分子に対する縮尺単位を表わす。

II. 計算式の誘導

1. 基本式 調圧水槽面積が高さによつて変化しない調圧水槽を持つ圧力トンネルの内部水柱に対する連続方程式と運動方程式は F. Prasil によれば

連続方程式  $q = f \cdot v + F \cdot \frac{dz}{dt}$  .....(1)

運動方程式  $\frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = z \mp \alpha v^2 \pm \alpha_1 \frac{F^2}{f^2} \left( \frac{dz}{dt} \right)^2$  .....(2)

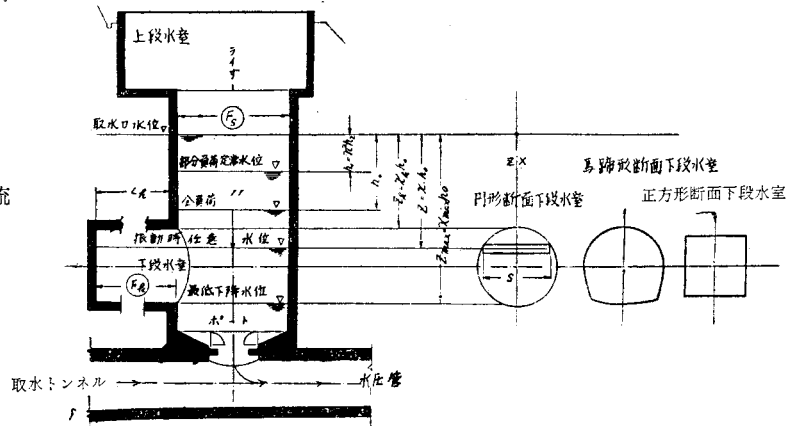
ここに運動方程式の右辺の前置符号は流れが水車に向うとき上側をとり反対に向くとき下側をとる。

水車の使用水量に関する方程式は負荷変動に応じていかに水車調速が行われるかによつて与えられ, 水車調速は必ずしも一定法則に従つて行われぬが, 調圧水槽の水理計算では, 水車調速は振動安定条件式の誘導に当つては出力一定調速の場合, 最大振幅計算式の誘導に当つては使用水量一定調速の場合を考慮する。

出力一定調速の場合には

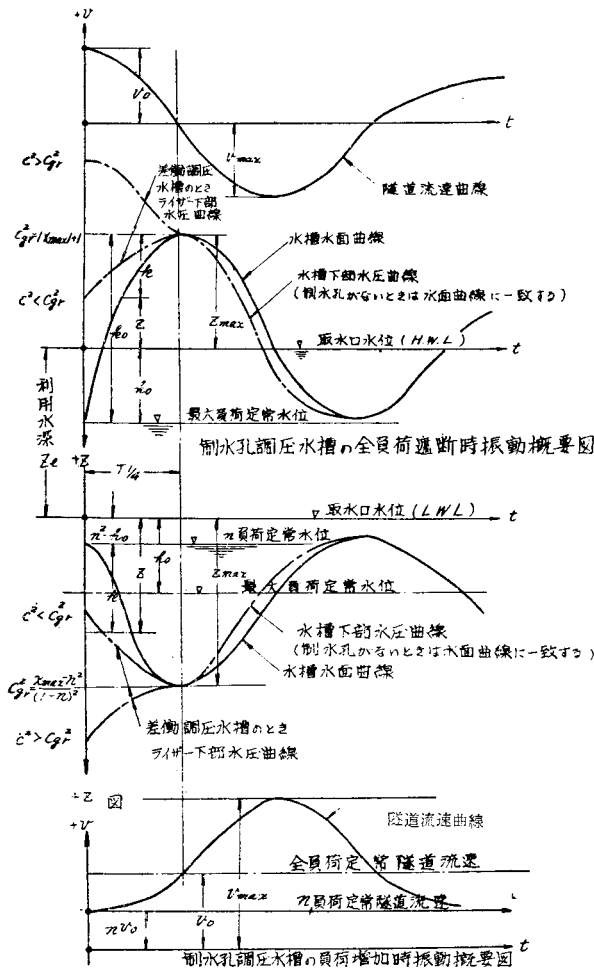
調速方程式  $q = \frac{C}{\left[ H_0 - \left\{ z + \alpha_1 \cdot \frac{F^2}{f^2} \cdot \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right\} \right]}$  .....(3)

図-2 水室付制水孔調圧水槽説明図



〔摘要〕 下段水室は堅坑を拡張して築造する場合もあるが, 高水圧を受ける関係上, 円形断面トンネル (稀に馬蹄形断面トンネル) として築造する場合が多い。トンネル下段水室を利用する考へていけば測量設計の行程に応じて水槽下部トンネル敷高を早目に決めても水室延長の増減で設計が加減できる便宜が与えられる。

図-3 等断面制水孔調圧水槽の場合の振動図



註:水室付のものでは、水室に応じて波形が偏平化する。

ここに右辺分母の末項に相当する制水孔の抵抗による落差損失は、適当に設計された制水孔調圧水槽では振動期間中はほぼ一定に保たれ、制水孔損失水頭による総落差の減少を考慮すればよいことになり、一般には総落差の最小値として次の常数值

$$H_0 - \alpha_1 \frac{F^2}{f^2} \cdot \left( \frac{dz}{dt} \right)_{\substack{v=0 \\ z=0}}^2 \dots\dots\dots (4)$$

を考慮すればよい。結局調速方程式としては次の近似式を使用する。

$$\text{調速方程式 } q \doteq \frac{C}{H_0 - z} \dots\dots\dots (5)$$

ただし運動方程式では制水孔の抵抗による落差損失は省略しないで取扱う。

$$\text{使用水量一定調速での調速方程式は} \\ \text{調速方程式 } q = \text{一定} \dots\dots\dots (6)$$

2. 振動安定条件式 (1),(2),(5) 式から得られる

振動方程式は、平衡水面  $z_0$  からの水面偏位  $s$  を導入して

$$z = z_0 + s \dots\dots\dots (7)$$

整理した形で

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \left\{ \frac{2 \alpha g C}{L f (H_0 - z_0 - s)} - \frac{C}{F (H_0 - z_0 - s)^2} \right. \\ \left. - \frac{g F}{L f} (\alpha - \alpha_1) \frac{ds}{dt} \right\} \cdot \frac{ds}{dt} + \left\{ \frac{g f}{L \cdot F} \right. \\ \left. - \frac{\alpha g C^2}{L \cdot F (H_0 - z_0)^2} \cdot \left( \frac{2}{H_0 - z_0} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3 s}{(H_0 - z_0)^2} + \dots \right) \right\} s = 0 \dots\dots (8)$$

(8) 式は J. Schüller に従えば係数が正なるとき減衰する振動を与える。

まづ  $s$  の係数が正なる条件より

$$z_0 < \frac{H_0}{3} - \frac{z_0 \cdot s}{H_0 - z_0} \dots\dots\dots (9)$$

次に  $\frac{ds}{dt}$  の係数が正なる条件より

$$F > \frac{L \cdot f}{(\alpha + \alpha_1) g (H_0 - z)} \\ \left\{ 1 + \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha + \alpha_1} \cdot \frac{v (H_0 - z)}{v_0 (H_0 - z_0)} \right\} \\ = \frac{L \cdot f}{(\alpha + \alpha_1) g (H_0 - z_0 - s)} \\ \left\{ 1 + \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha + \alpha_1} \cdot \frac{v (H_0 - z_0 - s)}{v_0 (H_0 - z_0)} \right\} \dots\dots (10)$$

(9),(10) 式は一定出力のもとに振動しながら発電しうる条件を示すもので、(9) 式は総落差、定常運転時の落差損失ならびに水面振動による落差損失間の条件関係を示し、調圧水槽自体には関係しない。(10) 式は調圧水槽水平面積が調圧水槽振動系の諸条件によつて具備しなくては、負荷変動にともなつて振動しながら、出力一定の継続運転をなし得ない条件を示す。

(9),(10) 式はともに変数を含むが、実際運転に表われる最悪条件により、極限值をもつて制限し実用式を誘導することができる。すなわち (9) 式において  $s$  は

$$s = 0 \sim (z_{\max} - z_0) \dots\dots\dots (11)$$

の範囲で変化し、そのときの条件式は

$$z_0 < \frac{H_0}{3} \sim \left\{ \frac{H_0}{3} - \frac{z_0 (z_{\max} - z_0)}{H_0 - z_0} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

(10) 式においては、実際運転に表われる変化の最も広い場合として (1/4 週期ごとに同じ取扱いができるので) 無負荷運転静止状態 ( $z=0$ ) から全負荷に始

動して水槽水面が最低位置 ( $z = z_{\max}$ ) に下るまでを考へる。この間に非減衰的傾向が表われなければ一般に振動は安定すると考へられる。まづ始動の初期において (10) 式の右辺は明らかに  $\frac{L \cdot f}{(\alpha + \alpha_1) g H_0}$  となり、

漸次水面が下降して最低位置に達した 1/4 週期においては、このとき水槽から水量補給が行われないので、(10) 式右辺分母の末項は

$$\frac{v(H_0 - z)}{v_0(H_0 - z_0)} = \frac{f \cdot v_{z=z_{\max}}(H_0 - z_{\max})}{f v_0(H_0 - z_0)} = \frac{C_0}{C_0} = 1$$

とおくことができ、結局 (10) 式の右辺全体は

$$\frac{L \cdot f}{2 \alpha g (H_0 - z_{\max})}$$

となる。以上兩極限値内で一般的に (10) 式が成立することになり、(10) 式の実用条件式として次式が与えられる。

$$F > \frac{L \cdot f}{(\alpha + \alpha_1) g H_0} \sim \frac{L \cdot f}{2 \alpha g (H_0 - z_{\max})} \dots\dots\dots (13)$$

微小振動に関する D. Thoma 条件式は (9), (10) 式において微小量  $s$  を省略し、(または  $z_{\max} - z_0 = 0$ ),  $z = z_0$ ,  $v = v_0$  において与えられる。

以上による必要条件式を比値記号で示すと

$$\text{落差条件式: } \beta < \frac{1}{3} \sim \left\{ \frac{1}{3} - \frac{\beta^2 (x_{\max} - 1)}{1 - \beta} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{面積条件式: } \epsilon_F > \frac{\beta}{1 + c^2} \sim \frac{\beta}{2(1 - \beta \cdot x_{\max})} \dots\dots\dots (15)$$

出力一定常運転状態に対する D. Thoma の必要条件式は

$$\text{落差条件式: } \beta < \frac{1}{3} \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{面積条件式: } \epsilon_F > \frac{\beta}{2(1 - \beta)} \dots\dots\dots (17)$$

この場合に振動性を帯びない所謂無波動条件式は

$$\epsilon_F \geq \frac{\beta^2}{2(1 - \beta)(1 - 2\beta) \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\beta}{1 - 2\beta} \right)^2} \right\}} \dots\dots\dots (18)$$

3. 最大振巾計算式

振動が安定する水槽形状では 1/4 週期に最大振巾が現われる。

i. 最高水面上昇計算式 全負荷 (負荷率 1) より無負荷に瞬間的に負荷遮断する場合の水槽水面の最高上昇高の計算式。

発電所負荷の一部が遮断されて負荷率  $n$  に移つたときの 1/4 週期における上昇波の方程式は

$$(n - y) \frac{dy}{dx} = \epsilon_F \{ x - c^2(n - y)^2 - y^2 \} \dots\dots\dots (19)$$

この式は解析的には未だに解かれていないが  $n = 0$  の

場合、すなわち全負荷が急断されて無負荷状態に移つた場合の次式

$$-y \cdot \frac{dy}{dx} = \epsilon_F \{ x - (1 + c^2)y^2 \} \dots\dots\dots (20)$$

は解くことができる。その解は

$$y^2 = \frac{1}{2 \epsilon_F (1 + c^2)^2} \{ 2 \epsilon_F (1 + c^2)x + 1 \} + C \cdot e^{2 \epsilon_F (1 + c^2)x} \\ = \left\{ \frac{x}{1 + c^2} + \frac{1}{2 \epsilon_F (1 + c^2)^2} \right\} + C \cdot e^{2 \epsilon_F (1 + c^2)x} \dots\dots\dots (21)$$

全負荷平衡運転状態からの瞬間的全負荷遮断では、初期条件が  $x = y^2 = 1$  で与えられるから、この関係を (21) 式に代入して積分常数  $C$  を求めると

$$C = e^{-2 \epsilon_F (1 + c^2)} \left\{ 1 - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_F} - \frac{1}{1 + c^2} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$C$  を消去した関係式で (21) 式は

$$y^2 = \frac{x}{1 + c^2} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_F} + \left\{ 1 - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_F} - \frac{1}{1 + c^2} \right\} e^{2(1 + c^2) \epsilon_F (x - 1)} \dots\dots\dots (23)$$

ライザー面積が  $\epsilon_{FS}$  にて上段水室敷高が  $x_k$  の高さにあるとき、ライザー水面がちようど上段水室敷高に達したときのトンネル流速 (または流量)  $y_k$  は (23) 式より

$$y_k^2 = \frac{x_k}{1 + c^2} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS}} + \left\{ 1 - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS}} - \frac{1}{1 + c^2} \right\} \cdot e^{2(1 + c^2) \epsilon_{FS} (x_k - 1)} \dots\dots\dots (24)$$

で与えられる。

次に、水平面積  $\epsilon_{FS+k}$  なる上段水室部分での水槽水位とそのときのトンネル流速 (または流量) の一般的关系式

$$y^2 = \frac{x}{1 + c^2} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS+k}} + C \cdot e^{2(1 + c^2) \epsilon_{FS+k} x} \dots\dots\dots (25)$$

において  $x = x_k$ ,  $y = y_k$  において積分常数  $C$  を求めると

$$C = \left\{ y_k^2 - \frac{x_k}{1 + c^2} - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS+k}} \right\} \times e^{-2(1 + c^2) \epsilon_{FS+k} x_k} \dots\dots\dots (26)$$

$C$  を消去した関係式で (25) 式は

$$y^2 = \frac{x}{1 + c^2} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS+k}} + \left\{ y_k^2 - \frac{x_k}{1 + c^2} - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS+k}} \right\} e^{2(1 + c^2) \epsilon_{FS+k} (x - x_k)} \dots\dots\dots (27)$$

(27) 式に (24) 式を代入して  $y_k^2$  を消去すると

$$y^2 = \frac{x}{1 + c^2} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS+k}} + \frac{1}{2(1 + c^2)^2} \left( \frac{1}{\epsilon_{FS}} - \frac{1}{\epsilon_{FS+k}} \right) e^{2(1 + c^2) \epsilon_{FS+k} (x - x_k)} + \left\{ 1 - \frac{1}{2(1 + c^2)^2 \epsilon_{FS}} \right\}$$

$$-\frac{1}{1+c^2}\left\{e^{2(1+c^2)\{\epsilon_{F_s}(x_{k-1})+\epsilon_{F_s+k}(x-x_k)\}}\right\} \dots\dots\dots (28)$$

もし、上段水室敷高以上をライザー部分と水室部分とに分けて

$$\epsilon_{F_s+k}=\epsilon_{F_s}+\epsilon_{F_k} \dots\dots\dots (29)$$

にて表わすならば (27) 式は

$$y^2 = \frac{x}{1+c^2} + \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}} + \left\{ y_k^2 - \frac{x_k^2}{1+c^2} - \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}} \right\} \cdot e^{2(1+c^2)(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x-x_k)} \dots\dots\dots (30)$$

(30) 式に (24) 式を代入して  $y_k^2$  を消去すると

$$y^2 = \frac{x}{1+c^2} + \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}} \quad * \\ 0 = \frac{x_{\max}}{1+c^2} + \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}} \cdot \left\{ 1 + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}} \cdot e^{2(1+c^2)(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k)} \right\} + \left\{ \frac{c^2}{1+c^2} - \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s}} \right\} \cdot e^{2(1+c^2)\{\epsilon_{F_s}(x_{k-1})+(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k)\}} \dots\dots\dots (32)$$

あるいは

$$\epsilon_{V_1-x_{\max}} = \epsilon_{F_s}(x_k-1) + (\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k) \\ = \frac{1}{2(1+c^2)} \cdot \log_e \cdot \frac{1+2(1+c^2)(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})x_{\max} + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}} \cdot e^{2(1+c^2)(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k)}}{1-2(1+c^2)c^2(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}) + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}}} \dots\dots\dots (33)$$

等断面制水孔調圧水槽の場合には (33) 式において、 $\epsilon_{F_k}=0$ 、 $\epsilon_{F_s}=\epsilon_F$  において

$$\epsilon_{V_1-x_{\max}} = \epsilon_F(x_{\max}-1) = \frac{1}{2(1+c^2)} \cdot \log_e \frac{1+2(1+c^2)\epsilon_F x_{\max}}{1-2(1+c^2)c^2 \cdot \epsilon_F} \dots\dots\dots (34)$$

単働水室調圧水槽の場合には (33) 式において  $c^2=0$  において

$$\epsilon_{V_1-x_{\max}} = \epsilon_{F_s}(x_k-1) + (\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k) \\ = \frac{1}{2} \log_e \frac{1+2(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k}) \cdot x_{\max} + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}} \cdot e^{2(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x_{\max}-x_k)}}{1 + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}}} \dots\dots\dots (35)$$

等断面単働調圧水槽の場合には (33) 式において  $\epsilon_{F_k}=0$ 、 $\epsilon_{F_s}=\epsilon_F$ 、 $c^2=0$  において

$$\epsilon_{V_1-x_{\max}} = \epsilon_F(x_{\max}-1) \\ = \frac{1}{2} \log_e (1+2\epsilon_F \cdot x_{\max}) \dots\dots\dots (36)$$

制水孔下部に  $x_{\max}$  = 一定なる減速水頭の働らくことを前提とする理想調圧水槽では (20) 式において  $x=x_{\max}$  において積分し、 $y^2=0$  において

$$\epsilon_V = \frac{1}{2} \log_e \left( 1 + \frac{1}{|x_{\max}|} \right) \dots\dots\dots (37)$$

等断面理想調圧水槽では

$$\epsilon_V = \epsilon_F(|x_{\max}|+1) \dots\dots\dots (38)$$

とおかれるので水槽面積計算式は

$$* \times \left\{ 1 + \frac{\epsilon_{F_k}}{\epsilon_{F_s}} \cdot e^{2(1+c^2)(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x-x_k)} \right\} \\ + \left\{ \frac{c^2}{1+c^2} - \frac{1}{2(1+c^2)^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_{F_s}} \right\} \\ \times e^{2(1+c^2)\{\epsilon_{F_s}(x_{k-1})+(\epsilon_{F_s} + \epsilon_{F_k})(x-x_k)\}} \dots (31)$$

(23), (31) 式によつて水槽水位とトンネル流速の一般的关系が与えられ、(31) 式において  $F_{s+k}=\epsilon_{F_s}=\epsilon_F$ 、 $(\epsilon_{F_k}=0)$  とおけば等断面制水孔調圧水槽に対する水位流速関係式が与えられ、(31) 式において  $c^2=0$  とおけば単働水室調圧水槽に対する水位流速関係式が与えられ、さらに (31) 式において  $\epsilon_{F_s+k}=\epsilon_{F_s}=\epsilon_F$ 、 $(\epsilon_{F_k}=0)$ 、 $c^2=0$  とおけば等断面単働調圧水槽に対する水位流速関係式が与えられる (計算式省略)。

いずれの場合にも  $y=0$  のとき  $x=x_{\max}$  が与えられ、一般的に水室付制水孔調圧水槽の場合の計算式は (31) 式より

$$\dots\dots\dots (32)$$

$$+ \epsilon_F = \frac{1}{2(|x_{\max}|+1)} \cdot \log_e \left( 1 + \frac{1}{|x_{\max}|} \right) \dots\dots (39)$$

固定制水孔を利用して理想調圧水槽に近い調圧水槽を設計するには制水孔寸法を

$$c^2 = |x_{\max}| + 1 \dots\dots\dots (40)$$

によつて決めなくてはならない。

この制水孔条件を満足する制水孔調圧水槽、差働調圧水槽並びに一般的に改良型水室調圧水槽容積は (37) 式によつて近似計算することができる。ただし制水孔を持つ調圧水槽では、必ずしも遮断水量が大きいほど大きい水面上昇を与えるとは限らないで最高水面上昇を与える遮断水量があり、この水量 (限界水量と呼ばれている) が最大使用水量以下に表われる場合が問題

となるのでその関係を誘導する。

(33) 式において

$$x_{\max} = \frac{z_{\max}}{h_0}, x_k = \frac{z_k}{h_0}, \epsilon_{F_s} = \frac{gF_s h_0^2}{L \cdot f v_0^2} = \frac{\alpha g F_s}{L \cdot f} h_0$$

$$\epsilon_{F_{s+k}} = \frac{g F_{s+k} \cdot h_0^2}{L \cdot f \cdot v_0^2} = \frac{\alpha g F_{s+k}}{L \cdot f} \cdot h_0 \text{ と置きかえ}$$

$$a_s = \frac{2(1+c^2)\alpha g F_s}{L \cdot f}, a_{s+k} = \frac{2(1+c^2)\alpha g \cdot F_{s+k}}{L \cdot f} *$$

$$\frac{dz_{\max}}{dh_0} = \frac{\{a_s c^2 h_0 - (1+c^2)\} e^{a_s(z_k - h_0) + a_{s+k}(z_{\max} - z_k)}}{1 + (1+c^2) \left( \frac{a_{s+k}}{a_s} - 1 \right) \cdot e^{a_{s+k}(z_{\max} - z_k)} + \left( a_k c^2 h_0 - \frac{a_{s+k}}{a_s} \right) \cdot e^{a_s(z_k - h_0) + a_{s+k} z_{\max} - z_k}} = 0 \dots (42)$$

これより

$$h_0 = \frac{1+c^2}{\alpha_s c^2} = \frac{L \cdot f}{2 \alpha c^2 g F_s} \dots (43)$$

あるいは

$$\epsilon_{F_s} = \frac{1}{2 c^2} \dots (44)$$

これより極値を持つ水槽面積を検討することができる。

また  $Q_0 = f \cdot \sqrt{\frac{h_0}{\alpha}}$  なる関係があるので

$$Q_0 = f \sqrt{\frac{L f}{2 \alpha^2 c^2 g F_s}} \dots (45)$$

あるいは

$$p = \frac{Q_{gr}}{Q_0} = \frac{1}{\sqrt{2 c^2 \epsilon_{F_s}}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{F_s} g r}{\epsilon_{F_s}}} \dots (46)$$

ここに  $gr$  なる添字は限界値なることを示す。

これによれば限界水量はライザー面積に関係し水室面積には関係しないことがわかる。

ii. 最低水面下降計算式 負荷率  $n$  より全負荷(負荷率 1) に瞬間的に負荷増加する場合の水槽水面の最低下降高の計算式(最低下降高を決めての必要水槽面積の計算式)。

発電所の負荷の一部が急増されて負荷率  $n_0$  に移つた時の 1/4 週期における下降襲波の方程式は

$$(n_0 - y) \frac{dy}{dx} = \epsilon_F \cdot \{x + c^2(n_0 - y)^2 - y^2\} \dots (47)$$

全負荷への急増では  $n_0 = 1$  において

$$(1 - y) \frac{dy}{dx} = \epsilon_F \cdot \{x + c^2(1 - y)^2 - y^2\} \dots (48)$$

これ等の式は解析的には未だに解かれていない。トンネル水柱の加速水頭が水槽水面の下降高  $x$  に応じて漸変する等断面単働調圧水槽と同じく加速水頭が、水+

\*  $\frac{F_s}{F_{s+k}} = \frac{a_s}{a_{s+k}}$  において整理すると

$$0 = z_{\max} + \frac{1}{a_{s+k}} + \frac{1+c^2}{a_s} \left( 1 - \frac{a_s}{a_{s+k}} \right) \cdot e^{a_{s+k} z_{\max} - z_k} + \left( c^2 h_0 - \frac{1}{a_s} \right) \cdot e^{a_s(z_k - h_0) + a_{s+k}(z_{\max} - z_k)} \dots (41)$$

この式で  $z_{\max}, h_0$  以外は水路、水槽並びに制水孔の寸法と粗度が既知であれば常数となる。従つてこの式を微分し、微分値を 0 に等しくおいて

+ 槽水面には無関係に最大一定値  $x = x_{\max}$  に保たれる等断面理想調圧水槽との、いわば機能動作の両極限の水槽間には、次のごとき積分値の等値関係がある\*\*。

等断面単働調圧水槽において

$$\int_{n^2}^{x_{\max}} \epsilon_{F_2} (x - n^2)^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}} - 1} \cdot dx = \epsilon_{F_1} (x_{\max} - n^2)^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}}} \dots (49)$$

等断面理想調圧水槽において

$$\int_{n^2}^{x_{\max}} \epsilon_{F_1} (x_{\max} - n^2)^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}} - 1} \cdot dx = \epsilon_{F_1} (x_{\max} - n^2)^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}}} \dots (50)$$

両者の積分値は相等しい。

われわれが設計する調圧水槽は一般に両者の中間の機能動作を持つので、上式左辺に該当する積分値もまた共通積分値に等しいと仮定することができる。

共通積分値  $I$  は水室付制水孔調圧水槽では堅抗部分積分値  $I_s$  と水室部分積分値  $I_k$  との和で与えられ

$$I = I_s + I_k = \int_{n^2}^{x_{\max}} \epsilon_{F_s} \{x + c^2(1 - y)^2 - n^2\}^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}} - 1} \cdot dx + \int_{x_k}^{x_{\max}} \epsilon_{F_k} \{x + c^2(1 - y)^2 - n^2\}^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}} - 1} \cdot dx \dots (51)$$

しかるに

$$(1 - y)^2 \doteq \frac{(1 - n)^2}{x_{\max} - n^2} \cdot (x_{\max} - x) \dots (52)$$

なる近似的関係が与えられるので、これにより  $y$  を消去して (50) 式を積分して共通値に等しいとおいて整理すれば

$$\epsilon_{F_s} \left[ 1 - \left\{ \frac{c^2(1 - n^2)^2}{x_{\max} - n^2} \right\}^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}}} \right] + \epsilon_{F_k} \left[ 1 - \left\{ \frac{x_k - n^2}{x_{\max} - n^2} + \frac{c^2(1 - n)^2(x_{\max} - x_k)}{(x_{\max} - n^2)^2} \right\}^{\frac{\epsilon_{F_2}}{\epsilon_{F_1}}} \right] = \epsilon_{F_2} \left\{ 1 - \frac{c^2(1 - n^2)^2}{x_{\max} - n^2} \right\} \dots (53)$$

\*\* Vogt はこの関係を水室調圧水槽の近似計算に利用している。

(53) 式において  $\epsilon_{Fs} = \epsilon_F$ ,  $\epsilon_{Fk} = 0$  とおけば等断面制水孔調圧水槽に対する次の計算式が与えられる,

$$\epsilon_F = \epsilon_{F2} \cdot \frac{1 - \frac{c^2(1-n)^2}{x_{\max} - n^2}}{1 - \frac{c^2(1-n)^2}{x_{\max} - n^2}}^{\epsilon_{F2}/\epsilon_{F1}} \dots (54)$$

$$\epsilon_{Fk} = \epsilon_{F2} \frac{1 - \frac{\epsilon_{Fs}}{\epsilon_{F2}}}{1 - \left(\frac{x_k - n^2}{x_{\max} - n^2}\right)^{\epsilon_{F2}/\epsilon_{F1}}} \dots (55)$$

$$L_k = \frac{L \cdot f \cdot v_0^2}{g \cdot h_0^2} \cdot \frac{\sum_{x_k}^{x_{\max}} \left\{ x - n^2 + \frac{c^2(1-n)^2}{x_{\max} - n^2} \cdot (x_{\max} - x) \right\}^{\epsilon_{F2}-1} \cdot s \cdot dx}{\left[ 1 - \frac{\epsilon_{Fs}}{\epsilon_{F2}} \cdot \frac{1 - \frac{c^2(1-n)^2}{x_{\max} - n^2}}{1 - \frac{c^2(1-n)^2}{x_{\max} - n^2}} \right]^{\epsilon_{F2}/\epsilon_{F1}}} \dots (56)$$

単動水室調圧水槽の場合には (56) 式で  $c^2 = 0$  とおいて

$$L_k = \frac{L \cdot f \cdot v_0^2}{g \cdot h_0^2} \cdot \frac{\epsilon_{F1} (x_{\max} - n^2)^{\epsilon_{F2}/\epsilon_{F1}} \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{Fs}}{\epsilon_{F2}}\right)}{\sum_{x_k}^{x_{\max}} (x - n^2)^{\epsilon_{F1}-1} \cdot s \cdot dx} \dots (57)$$

右辺分母は計算枠を作成して計算する,

等断面単動調圧水槽に対する  $\epsilon_{F2}$  の計算式は Vogt の近似式によれば

$$x_{\max} = 1 + \left\{ \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{F2}} - 0.275\sqrt{n}} + 0.05 \epsilon_{F2} - 0.9 \right\} (1-n) \cdot (1-n \epsilon_{F2}^{0.62}) \dots (58)$$

等断面理想調圧水槽に対する  $\epsilon_{F1}$  の計算式は  $x = x_{\max} = \text{一定}$  として基本式を積分して与えられ,

$$\epsilon_{F1} = \frac{1}{2(x_{\max} - n^2)} \cdot \log_e \left\{ \frac{x_{\max} - 1}{x_{\max} - n^2} \cdot \left( \frac{\sqrt{x_{\max} + 1}}{\sqrt{x_{\max} - 1}} \cdot \frac{\sqrt{x_{\max} - n}}{\sqrt{x_{\max} + n}} \right)^{1/\sqrt{x_{\max}}} \right\} \dots (59)$$

固定ポートを用いて理想調圧水槽とするには制水孔は

$$c^2 \doteq \frac{x_{\max} - n^2}{(1-n)^2} \dots (60)$$

を満足するものでなくてはならない。

結 語

以上より従来示されていない制水孔付調圧水槽の設計に必要な諸計算式を示した。調圧水槽の設計に際しては落差並びに使用水量のとり方、水車調速時間の影響の考慮等の設計条件に対する吟味が残されているが、これ等は紙数の都合で省略したので、拙著「調圧水槽」を参照願いたい。

(53) 式において  $c^2 = 0$  とおけば単動水室調圧水槽に対する計算式(55)が与えられる。

円形、馬蹄形断面の下端水室は中心軸を共通とし、鉛直断面積の等しい正方形断面の下端水室におき換え近似計算することができる。

円形または馬蹄形等任意断面によつて計算するには、以下に示す式による。

一般的に制水孔付水室調圧水槽の場合には

近來多用される制水孔調圧水槽では制水孔による水衝圧の不完全反射が水管管路に及ぼす影響もまた問題となる。

これは調圧水槽の問題というよりむしろ水管の問題に属し古くより C.Jaeger が取扱っている。Theorie générale du coup de bélier 及び Technische Hydraulik に示されているので参照されたい。

\*\*\*振動安定上有利な下ぶくれの調圧水槽、調圧水槽の理論的最終形状、放水路の調圧水槽、取水路放水路の組合せ調圧水槽、水槽を2個持つ組合せ調圧水槽などの、従来ほとんど理論展開のみられなかつた、しかも重要な調圧水槽の水理計算に関しては、昨年取り纏めてコロナ社より「調圧水槽」として出版しているので本文には省略したが、調圧水槽の設計は調圧水槽自体の設計にとどまらず、水路全般の設計に関係し、水力の開発方式が進歩するにつれて慎重を要する場合が多く、これが設計をあやまり、発電用水路が致命傷を受けた実例も少くないので充分参考検討頂きたい。

**コンクリート標準示方書**

B 6 判 266 頁 180 円 (〒 30 円)

☆ ☆ ☆

**コンクリート標準示方書解説**

B 5 判 167 頁 300 円 (〒 30 円)