

佐久間第2発電所水理模型実験と非定常流数値解析

Hydraulic Model Test and Numerical Analysis of Unsteady Flow on Sakuma 2nd Power Station

電源開発株式会社 正員 高山 信 紀

電源開発株式会社 ○橋 本 信 雄

1. まえがき

電力需要の変化に伴う周波数自動調整運転（AFC運転）や負荷遮断、負荷急増を行う場合、水力発電設備の水路系には流量の時間的变化により波動の伝播を伴う流れが生ずる。この流れは断面変化部や横越流、合流、分流等があれば一層複雑となる。

本研究は上記現象の解析手法を確立することを目的に、当社の佐久間第2発電所水路系をモデルに行った水理模型実験（無歪模型と歪模型を組み合わせ使用）と開水路の非定常流数値解析（陰形式差分法）結果について述べたものである。

2. 佐久間第2発電所の概要

佐久間第2発電所は佐久間発電所（以後親発電所と呼ぶ）と秋葉調整池との間の残存落差 15 m を利用し、親発電所の使用水（最大 $306 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を直接取水し、天竜川河床下を横断するボックスカルバート形式の逆サイホンで対岸の水槽に導き、発電所（最大出力 3.2 万 kW、チューブラータービン水車 2 台）に導水し発電を行った後、無圧の放水路トンネル（標準馬てい形、直径 10.3 m、長さ約 3.2 km、勾配 $1/2000$ ）により秋葉調整池へ放流するものである。また本発電所が発電停止した場合でも親発電所が運転できるように、発電所をバイパスする形で水槽右岸より放水路トンネルへ至る余水吐が設けられている。

この発電所は親発電所の AFC 運転と連動して運転する他、負荷遮断、負荷急増時には、取水口～逆サイホン～水槽～余水吐～放水路トンネルと長大な水路系に非定常な流れが生ずる。

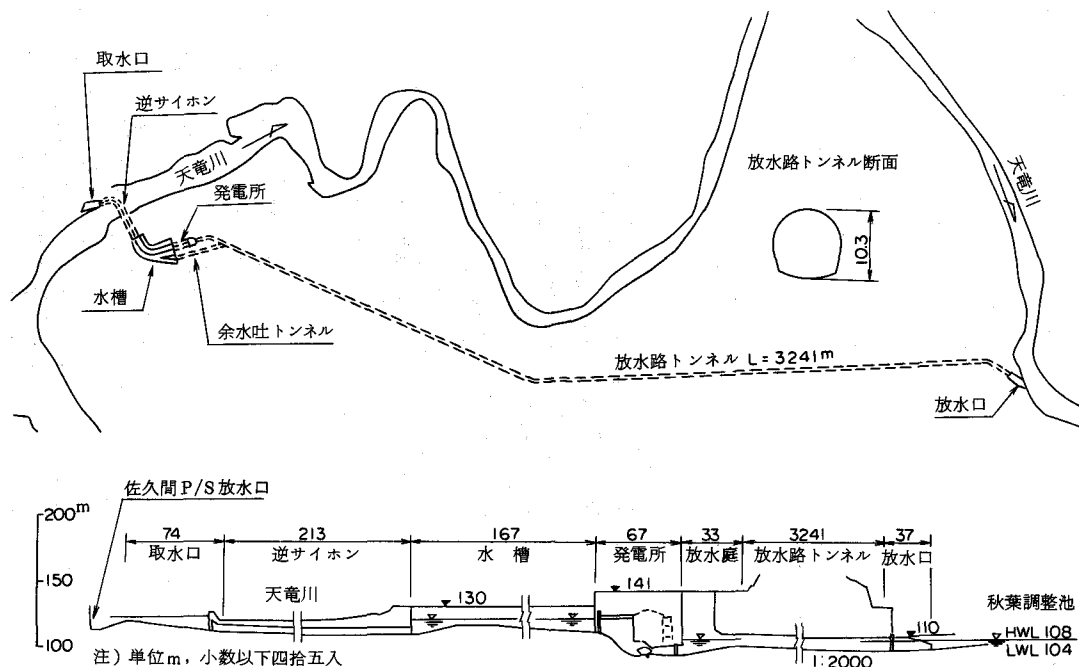


図-1 佐久間第2発電所計画一般

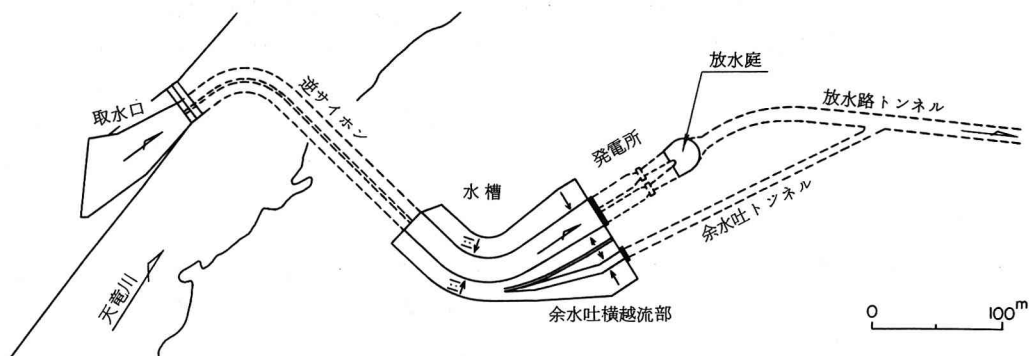


図-2 発電所付近詳細

(縦断)

3. 水理模型実験

3-1 模型装置

実験は一般に1/50の幾何学的に相似な模型でフルードの相似則に従って行ったが、放水路トンネル部は長大であり、粗度の影響が無視できないため、長さ方向に歪ませた模型とした。(3-2参照)

また水車の模型化は省略し、プロベラ流量計や損失調整板を組み込んで水車ロスを再現した。非常流実験の負荷遮断、負荷急増は放水庭直上流のスルースゲートの開閉により行い、親発電所のAFC運転は電動式コントロールバルブで自動的に行った。

3-2 相似則

a) 模型材料の粗度係数

模型材料としては粗度係数の小さい透明アクリル板を用いたが、力学的相似条件を考える場合、あらかじめ模型材料の粗度係数を知っておく必要がある。そこで本模型の放水路トンネル部において各流量に対する等流状態を作り、マンギングの式より粗度係数 n を逆算して整理した。その結果、模型の粗度係数 $n_M=0.0098$ となった。

b) 放水路トンネル以外の相似則

本実験で扱う現象においてはほとんど重力の作用が支配的であると考えられるので、フルードの相似則を適用し、幾何学的に相似な模型とし、長さの縮尺は1/50とした。従って、実物と模型の諸量の比は表-1のようになる。この場合、模型の実物換算粗度係数は $0.0098 \times 1.92 = 0.0188$ と実物(コンクリート)の設計粗度係数0.0125より大きい、放水路トンネル以外ではこれを無視した。

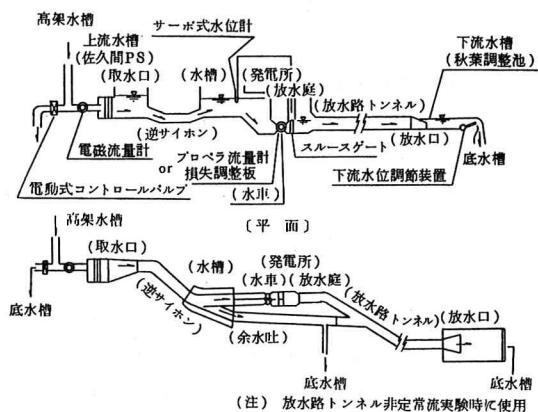


図-3 模型装置概念図

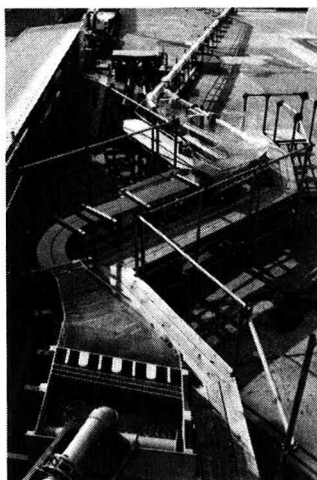


図-4 模型装置(上流側)



図-5 模型装置(下流側)

表-1 相似条件

	放水路トンネルを除く部分	放水路トンネル部
長さの縮尺比	$K_L = 1/50$	断面方向 $K_b = 1/50$ 長さ方向 $K_x = (1/50)^{3/2} / (0.784)^2 \div 1/113$
圧力	$K_p = K_L = 1/50$	$K_p = K_b = 1/50$
時間	$K_t = K_L^{1/2} \div 1/7.07$	$K_t = (1/50)^{3/2} / (0.784)^2 \div 1/16$
流速	$K_v = K_L^{1/2} \div 1/7.07$	$K_v = (1/50)^{1/2} \div 1/7.07$
流量	$K_Q = K_L^{3/2} \div 1/(17.7 \times 10^3)$	$K_Q = K_v K_A = K_b^{3/2} = (1/50)^{3/2} \div 1/(17.7 \times 10^3)$
粗度係数	$K_n = K_L^{1/6} \div 1/1.92$	$K_n \div 0.784 = 1/1.276$
トンネル勾配	$K_i = 1$	$K_i = (0.784)^2 / (1/50)^{1/2} \div 1/0.4416$

c) 放水路トンネル部の相似則

放水路トンネル以外では粗度の違いを無視したが、緩勾配で長大な放水路トンネル部においては粗度の影響による摩擦損失の違いを無視できないため、参考文献2)に従い、開水路の非定常流方程式から力学的相似条件を求めた。

開水路の非定常流の連続の式と運動方程式はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (A \cdot v) = 0 \quad (1)$$

$$-i + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

実物と模型が力学的に相似であるためには次の関係が成立することが必要である。ここで K_A は流水断面積 A の縮尺、 K_t は時間 t の縮尺……である。

$$\frac{K_A}{K_t} = \frac{K_A \cdot K_v}{K_x} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{K_h}{K_x} = \frac{K_n^2 K_v^2}{K_R^{4/3}} = \frac{K_\alpha \cdot K_v^2}{K_g K_x} = \frac{K_v}{K_g \cdot K_t} \quad (4)$$

(3)式、(4)式の第4、第5項から

$$\frac{1}{K_t} = \frac{K_v}{K_x} \quad \frac{K_\alpha \cdot K_v}{K_x} = \frac{1}{K_t}$$

となり、 $K_\alpha = 1$ の場合に等しくなる。すなわち一般に $\alpha \div 1$ であり、模型においても $\alpha_M \div 1$ を満足するように模型の歪ませ方に限界をおけば $K_\alpha = 1$ は常に満たされることになる。また $K_g = 1$ であるので所要の相似条件としては(3)式と(4)式を合わせた次のような式となる。

$$K_i = \frac{K_h}{K_x} = \frac{K_n^2 K_v^2}{K_R^{4/3}} = \frac{K_v^2}{K_x} = \frac{K_v}{K_t} \quad (5)$$

もし断面を歪ませないものとするれば、

$$K_h = K_R \quad (6)$$

となり、未知数は K_i 、 K_h 、 K_x 、 K_n 、 K_v 、 K_t の6個であり、方程式は4個であるから差引き2個の未知数を独立に選べば他の未知数は(5)式から求まる。

今、その未知数として K_h と K_n を選べば他の縮尺は(5)式と(6)式から次のようになる。

$$K_x = \frac{K_h^{3/2}}{K_n^2}, \quad K_v = K_h^{1/2}, \quad K_t = \frac{K_h^{3/2}}{K_n^2}, \quad K_i = \frac{K_n^2}{K_h^{1/2}} \quad (7)$$

すなわち、放水路トンネル部は(7)式の相似則に従って各縮尺を決めることとし、独立な縮尺は断面方向の長さ K_x と粗度係数 K_n の2個とした。

$$K_h = K_R = \frac{1}{50}$$

$$K_n = \frac{n_M}{n} = \frac{0.0098}{0.0125} \div 0.784$$

これを(7)式に代入して各縮尺を求めると表-1のようになる。従って、放水路トンネル部については長さ方向に縮めた模型となり、模型トンネル勾配は $i_M = i \cdot K_i = (1/2000) \times (1/0.4416) \div 1/883$ となる。

3-3 定常流実験

a) 取水口～放水口各部の流況

各流況とも穏やかで全体的に満足できる状況であった。

放水路トンネルの水面形については実験値と計算値を比較した。実験値は模型で測定された値を前述の相似則に基づき実物換算した値であり、計算値は不等流計算プログラムにより求めたものである。その結果、実験値と計算値はほぼ合致しており、不等流の場合、歪模型の相似条件は適当とみなされる。

b) 余水吐

余水吐は水槽からの横越流部と余水吐トンネルとから成っている。

原設計案の余水吐では流量が約 $210 \text{ m}^3/\text{s}$

以上となると不完全越流となり水槽水位が上昇する。これはトンネル途中に設置している

ゲート立坑からの空気の吸い込み量が多く、その分余水吐トンネルの有効断面積が減少する

ためと考えられる。参考のため、原設計案のゲート立坑を閉塞し

給気量をゼロにした状態では完全越流となり、

所定の流量を吐くことができる。

以上の結果から余水吐の流況を改良するため、①ゲート立坑位置、②呑口部形状と給気管、③トンネル縦断形状について検討を行った。

その結果、ゲートは呑口部前面に設置し、呑み込みを良くするため呑口部天端をベルマウス形状とした。また、 $\phi 40 \text{ cm}$ の給気管をベルマウス始端より 1.35 m の所に設けた。トンネルの縦断形状は原案と勾配一様とした場合の流況比較を行い、後者を採用した。この結果、横越流部は自由越流となり、トンネル内流況も改善された。

3-4 非定常流実験

負荷遮断時、負荷急増時、AFC運転時の流況や水位変化を調べるため実験を行った。流量条件を表-2に示す。

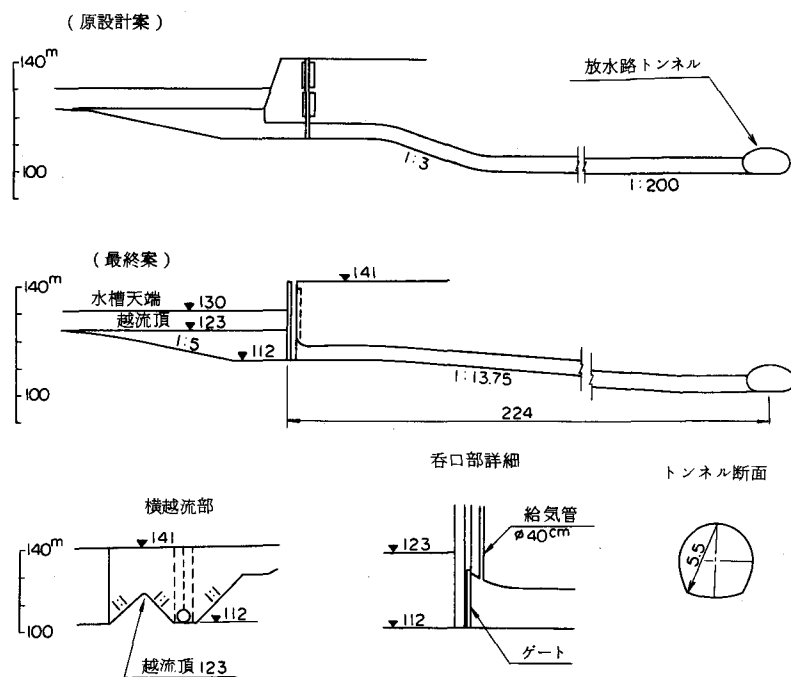


図-6 余水吐

a) 負荷遮断時の取水口、水槽の水位変動

水槽においては、発電所側から順次水位が上昇し始め、余水吐から越流が始まると小さな水位変動を伴いながら上昇勾配は急にゆるやかになり、水位は遮断後3～4分で安定する。

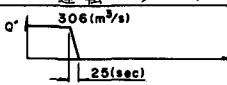
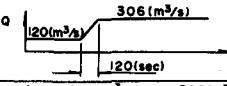
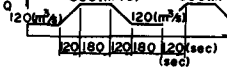
取水口ではなめらかに水位が上昇する。

b) 放水路トンネル

放水路トンネルは他の部分とは異なる相似則を適用した歪模型であるため、測定範囲はトンネル始点～終点までとした。また、負荷遮断時の余水吐トンネルからの全流は省略した。負荷遮断時、負荷急増時、AFC運転時の水面形と水位変動を図-7.8に示す。これより次のことがわかる。

- ・負荷遮断時の場合、放水路トンネル内の波動は放水庭と放水口の間で反射が繰り返され、除々に減衰するが、水面が安定するまでには相当の時間を要する。
- ・負荷急増時の場合、第1波が瞬間的に天端に達するものの、遮断時と比べて水位の安定は早い。
- ・AFC運転時はトンネル始点に次々に入る波動と放水口にて反射される波動とが重なり複雑になる。

表-2 非定常時流量条件

非定常状態	運転パターン
負荷遮断時	
負荷急増時	
AFC運転時	

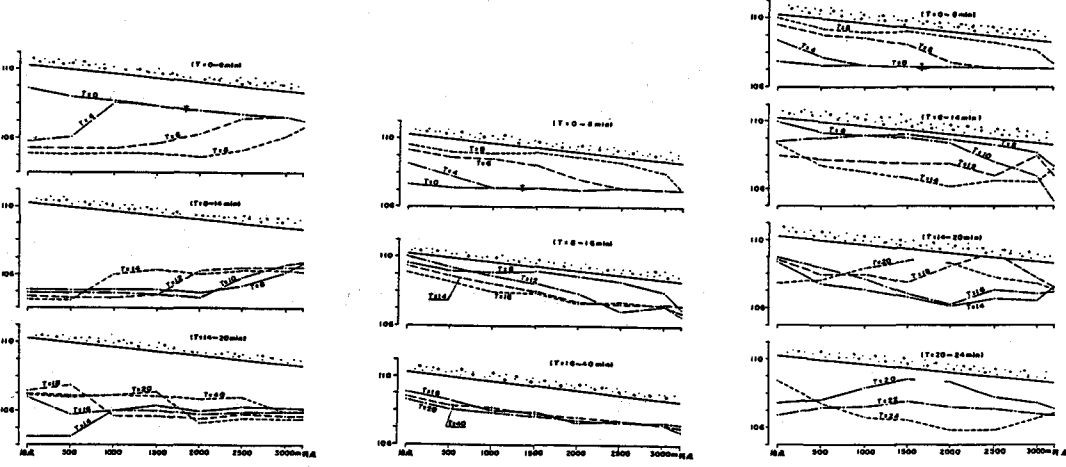


図-7 放水路トンネル内の水面変化

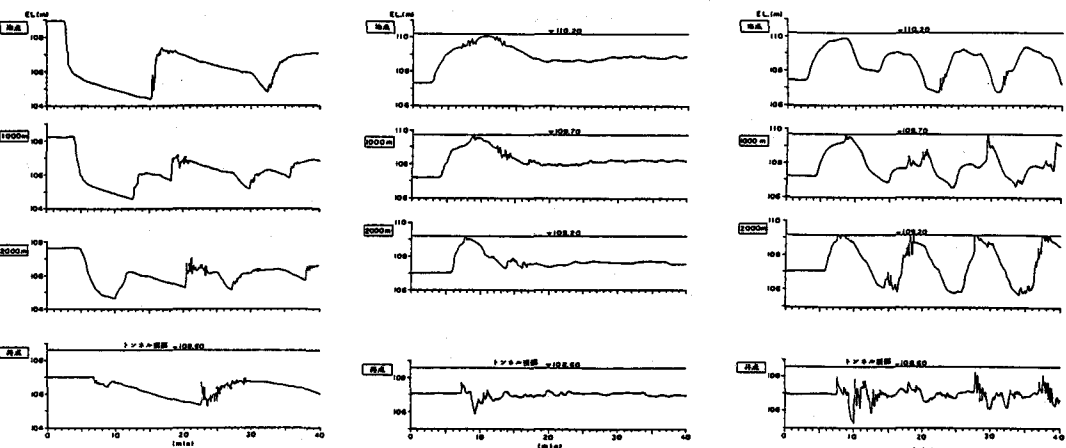


図-8 放水路トンネル内の水位変動

4. 非定常流数値解析

放水路トンネル部において参考文献3)を参考にして作成した陰形式差分法による非定常流数値解析プログラムを用いて、歪模型による実験結果との比較を行った。計算は上下流端とも時間～水位の実験値を境界条件として与え、各測点の各時間～水位を計算し、実験値と比較した。なお、負荷急増時とAFC運転時には一時的に水位が放水路トンネル天端に達し、現状のプログラムではそこで計算が停止してしまう。そこでこの2ケースについては放水に水位を更に下げて実験を行い、計算は放水路トンネル始点の水位変動が激しいため、500 m地点を上流端として行った。

その結果、図-9に示すように実験値と計算値はよく合致し、非定常流の場合でも歪模型の相似条件の妥当性が確かめられた。

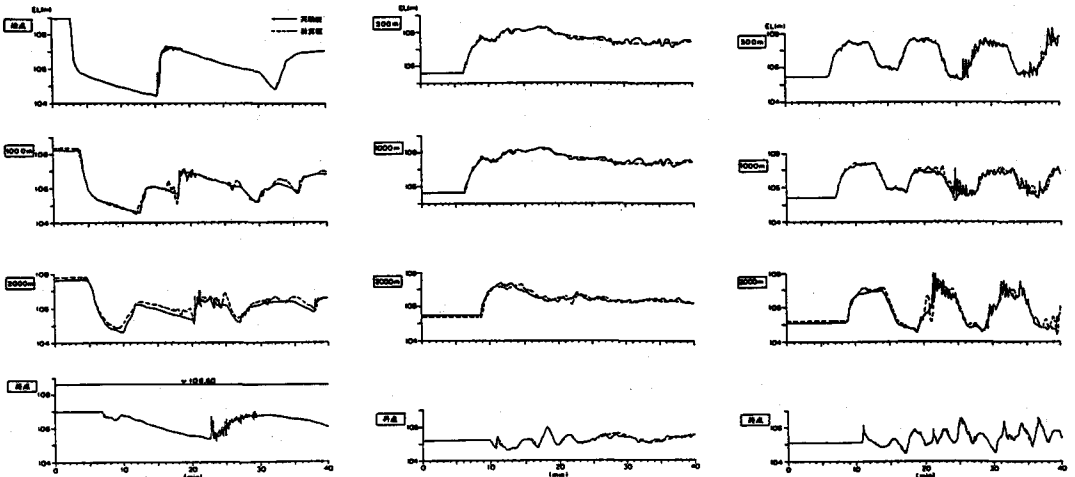


図-9 放水路トンネル水位変動(実験値と計算値の比較)

5. あとがき

佐久間第2発電所のような複雑な水路系の水理現象を詳細に把握するには、現在のところ水理模型実験によらざるを得ない。この場合、取水口や水槽、余水吐のような構造物の形状による影響を強く受ける流れの部分には幾何学的に相似な無歪模型、放水路トンネルのように他の構造物に比し極めて長大で粗度の影響の卓越する部分は歪模型を用い、各水路構造物の流れを把握し設計の一助とすることができた。

また、放水路トンネルのような同一断面、同一勾配の開水路の流れの解析には陰形式差分法による数値解析手法が有効であることを確認した。しかし、トンネルが一時的に閉塞するような場合には現プログラムでは解析できず、模型実験によらざるを得ない。

現在、上記プログラムの汎用性を高めるため、断面変化、横越流、合流、分流のある流れについて検討を行っている。

本研究の実施にあたり御指導、御協力いただいた土木試験所、設計室、佐久間水力建設所、(株)開発計算センターの方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 丸山昭平・川島義之：佐久間第2発電所の設計と施工、電力土木 58. 5
- 2) 林 泰造：非定常水流の相似律、流体模型実験における相似律セミナー '66-11-19
- 3) 神田 徹：不定流、土木学会関西支部昭和 50 年度講習会テキスト