UDC 532.59:621.311.2

ドラフトチューブにおける水柱分離現象

Water-column Separation in Draft Tube

新倉祥之* 松井弘*
Yoshiyuki Niikura Hiroshi Matsui

I. まえがき

吸出管の長い水車を急停止すると大きな静圧降下が吸出管内に生ずる．この静圧が水の飽和蒸気圧以下になるとその個所の水は気泡となり分離し，再結合の際非常に大きな圧力を生じ水車を損傷することもあり得る．従来はこのように放水路の長い発電所においては水車吸出管の直後に放水路サージタンクが設けられていたが，最近は発電所全体の経済性を考えて省略する要求が強い。

現在当社が製作中であるオーストラリア向けCETHANA発電所（落差 100m，出力 100MW）も放水路の長さが200mもあるにもかかわらず地下発電所であるため放水路サージタンクは設けられていない。

この水柱分離による水撃現象を実験的に発生させ，その現象を解析し，理論的近似計算で求めた結果と比較し近似計算式の信頼性を確認した．また分離した場合に吸出管内に給気し，再結合の際生ずる水撃作用を防止することを実験によって確かめた。

II. 記号

a_0：案内羽根開度〔mm〕　A_p：管断面積〔m²〕
D：管直径〔m〕　f：管内摩擦係数
H：圧力〔m〕　H_r：回復水頭〔m〕
GD^2：回転部慢性モーメント〔t-m²〕
L：管長さ〔m〕　N：水車回転数〔rpm〕
D：発電機出力〔kW〕　Q：流量〔m³/s〕
S：案内羽根ストローク〔mm〕
PL_0：発電機出力損失〔kW〕　L_{cav}：水柱分離距離〔m〕
t：急停止後の時間〔sec〕
α：圧力波の伝ぱ速度〔m/s〕
θ：配管の傾き〔deg〕

小文字：無次元量

$h=H/H_0$　　$q=Q/Q_0$
$n=N/N_0$

添字

1：水圧管部　　2：吸出管部
0：水車定常運転状態　　′：管内静圧
air：給気　　vp：水柱分離状態

III. 基礎方程式

管路中の水撃現象を表わす方程式としては次の連続の式と運動の式がある。(1)

$$\frac{\alpha^2}{A_p g}\cdot\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{Q}{A_p}\cdot\left(\frac{\partial H}{\partial x}+\sin\theta\right)+\frac{\partial H}{\partial t}=0 \quad \cdots(1)$$

$$g\cdot\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{A_p}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{f}{2D}\cdot\frac{Q}{A_p^2}\cdot|Q|=0 \quad \cdots(2)$$

上2式を解いて流量変化に対する管内水圧上昇を求めればよい訳だが，ここで次のような仮定を用いて解く。

〔仮定〕

1) 管摩擦損失は無視する。　$f=0$
2) 管路系はすべて水平である。　$\theta=0$ deg

この仮定により上2式は

$$\frac{\partial H}{\partial t}=-\frac{\alpha^2}{A_p g}\cdot\frac{\partial Q}{\partial x} \quad \cdots\cdots(1a)$$

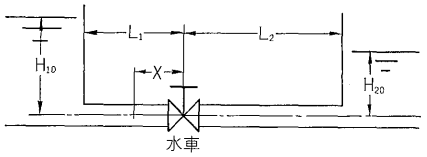
$$\frac{\partial H}{\partial x}=-\frac{1}{A_p g}\cdot\frac{\partial Q}{\partial t} \quad \cdots\cdots(2a)$$

となる．今定常運転状態条件として H_0, Q_0 を用いれば，上2式の一般解は下式のようになる。

$$H-H_0=F\left(t-\frac{x}{\alpha}\right)+f\left(t+\frac{x}{\alpha}\right) \quad \cdots\cdots(3)$$

$$Q-Q_0=\frac{gA_p}{\alpha}\cdot\left\{F\left(t-\frac{x}{\alpha}\right)-f\left(t+\frac{x}{\alpha}\right)\right\} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで $F(t-x/\alpha)$ は x 方向の進行波，$f(t-x/\alpha)$ は x 方向の後退波である。



第1図 管路系
Fig. 1. Pipe line

* 川崎工場原動機部

今弁の開閉にともない弁に生じた圧力変動の影響は時間 $T_r(=2L/d)$ 後に再び弁に返ってくるとする．この弁にもどってきた圧力波がそこで完全に反射されるものと仮定すれば，水圧管内の最大水圧上昇は弁で起こり，

$0<t\leqq t_{r1}$

$$h_1(t)-h_{10}=\frac{\alpha_1 V_{10}}{gH_0}\left\{q_0-q_1(t)\right\} \quad \cdots\cdots(5.1)$$

$(j-1)t_{r1}<t\leqq jt_{r1}$　　$j=2,\ 3,\cdots\cdots$

$$h_1(t)-h_{10}=\frac{\alpha_1 V_{10}}{gH_0}\left\{q_0-q_1(t)\right\}-2\sum_{k=1}^{j-1}\{h_1(t-kt_{r1})-h_0\} \quad \cdots\cdots(6.1)$$

となる。

吸出管の圧力も同様にして，

$0<t\leqq t_{r2}$

$$h_2(t)-h_{20}=-\frac{\alpha_2 V_{20}}{gH_0}\{q_0-q_2(t)\} \quad \cdots\cdots(5.2)$$

$(i-1)t_{r2}<t\leqq it_{r2}$　　$i=2,\ 3,\cdots\cdots$

$$h_2(t)-h_{20}=-\frac{\alpha_2 V_{20}}{gH_0}\{q_0-q_2(t)\}-2\sum_{m=1}^{i-1}\{h_2(t-mt_{r2})-h_0\} \quad \cdots\cdots(6.2)$$

となる。

水車の有効落差は，次式で与える。

$h(t)=h_1(t)-h_2(t)$

1)　水圧管内の静圧上昇は次式で求める。

$$H'_1(t)=H'_{10}+\{h_1(t)-h_{10}\}H_0+H_{r1}(t) \quad \cdots\cdots(8)$$

ここで

$$H_{r1}(t)=(H_1\mathrm{loss}+V_{10}^2/2g)\{1-q_1^2(t)\}$$ ；回復水頭

2)　吸出管内の静圧上昇も同様にして求まる。

$$H'_2(t)=H'_{20}+\{h_2(t)-h_{20}\}H_0+H_{r2}(t) \quad \cdots\cdots(9)$$

ここに

$$H_{r2}(t)=(V_{20}^2/2g-H_2\mathrm{loss})\{1-q_2^2(t)\}$$ ；回復水頭

水圧管，吸出管内に水が充満している場合には，

$$q_1(t)=q_2(t) \quad \cdots\cdots(10)$$

IV. 境　界　条　件

1. 水　柱　分　離

(9)式で求められる静圧 H'_2 が水の飽和蒸気圧 H_{vp} 以下に低下したときには，その個所で水柱分離を生じ，もはや(10)式は成立しなくなる。

水柱分離の現象に関し次の仮定を設ける。

1)　水柱分離した大きさは吸出管長さに比して非常に小さく，伝ぱ時間 t_{r2} にも影響を及ぼさない。

2)　圧力波は水柱分離した表面で完全に反射される。

3)　水柱分離した気泡の内部は蒸気圧一定である。

すなわち

$$H'_2(t)=H_{vp}=\text{一定} \quad \cdots\cdots(11)$$

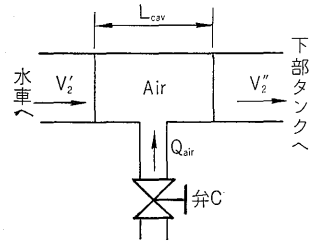
とすると(9)式より，

$$h_2(t)-h_{20}=\frac{H_{vp}-H'_{20}-H_{r2}(t)}{H_0} \quad \cdots\cdots(12)$$

となる．分離した水が再結合する際の水圧上昇は，

$$H'_2(t)=H_{vp}+\alpha_2(V'_2-V''_2)/g \quad \cdots\cdots(13)$$

となり非常に大きな圧力が生じ水車をいためることもあり得る．ここで V'_2 は水車側の水柱流速で，V''_2 は放水口側の水柱流速を示す。



第2図　吸出管
Fig. 2.　Draft tube

再結合の際の水撃作用を防止させるため，第2図に示すように静圧が，ある圧力 H_{air} 以下に降下したとき，弁Cを開いて空気を入れる．下流側の水柱が逆流を起こすまでは空気を吸入しているので圧力は一定で，

$$h_2(t)-h_{20}=(H_{air}-H'_{20}-H_{r2}(t))/H_0 \quad \cdots\cdots(14)$$

逆流が始まると逆止弁Cが閉って吸入された空気は圧縮されクッションの役をする．この過程を等温変化とすると，水柱分離距離は $L_{cav}=(V''_2-V'_2)\cdot t$ であるので，

$$H'_2(t)=(H_{air}+H_{at})\frac{L_{cav\cdot\max}}{L_{cav}(t)}-H_{at} \quad \cdots\cdots(15)$$

ここで $L_{cav\cdot\max}$ は逆流開始時の最大水柱分距離

2. 水　　車

1)　速　度　上　昇

水車をしゃ断してから t 秒後には水車ランナの回転数ははずみ車効果によって，

$$\frac{dn(t)}{dt}=\frac{365}{N_0^2\cdot GD^2}\cdot\frac{P(t)}{n(t)} \quad \cdots\cdots(16)$$

なる変化をする。

2)　発電機の出力変化

発電機の出力変化は次式で与えられる。

$$P(t)=g\cdot Q(t)\cdot H(t)\cdot(\eta_m+\Delta\eta)-PL_{os}(n)^k \quad \cdots\cdots(17)$$

ここで η_m：水車模型試験効率

3)　水車性能曲線

模型水車の特性曲線は一般に目玉曲線で与えられる。

$$Q'_1=f_1(n'_1,\ a_0) \quad \cdots\cdots(18)$$

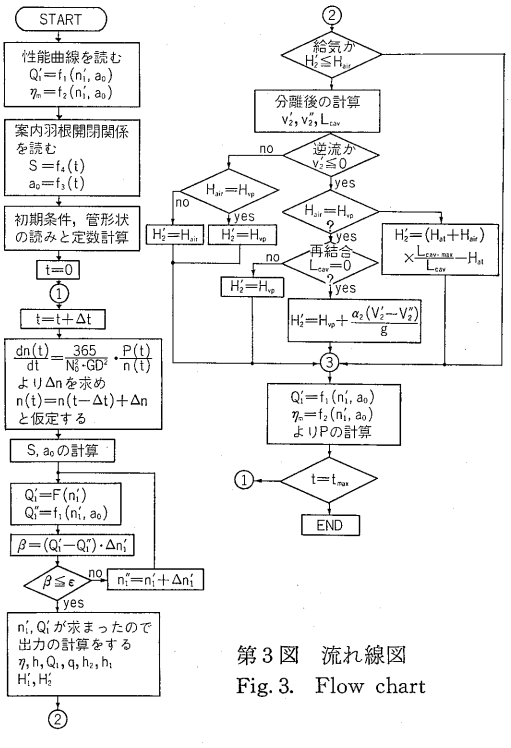
$$\eta_m=f_2(n'_1,\ a_0) \quad \cdots\cdots(19)$$

ここに

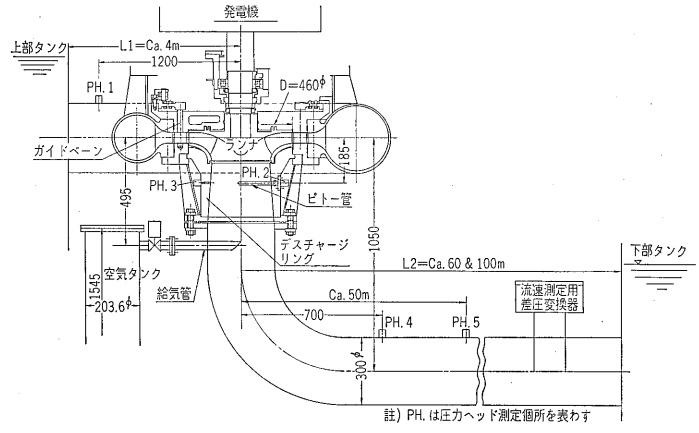
$$n'_1=n'_{10}\cdot n\cdot h^{-0.5} \quad \cdots\cdots(20)$$

$$Q'_1=Q'_{10}(Q/Q_0)\cdot h^{-0.5} \quad \cdots\cdots(21)$$

案内羽根開閉関係として次式が与えられる。



第3図　流れ線図
Fig. 3.　Flow chart



第4図　実験装置概略図
Fig. 4.　Test plant

$$s=f_4(t) \qquad \cdots\cdots(22)$$

$$a_0=f_3(s) \qquad \cdots\cdots(23)$$

V. 計　算　方　法

Ⅳ. で述べた境界条件を用いて水圧上昇を計算する訳だがこの計算方法の概要をフローチャートとして第3図に示す。

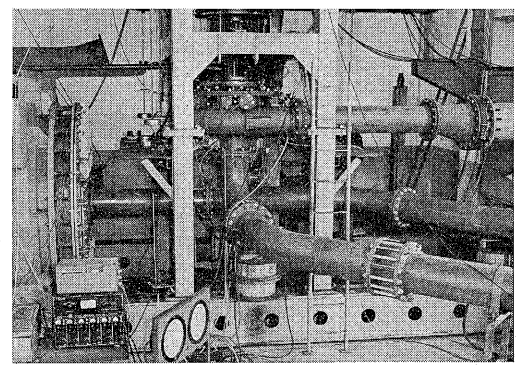
VI. 実　　験

1. 実　験　目　的

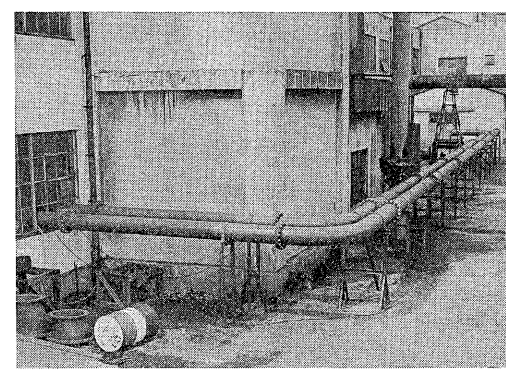
Ⅲ. で導びいた方程式は近似計算式であり，この計算結果と実際の現象とを比較する。

水車は正規状態以外の運転では吸出管内に旋回流を生じ，この影響で管内の水は分離しやすくなる．また水中の含有空気が放出されるため水の蒸気圧以上で水柱分離が起こることが予想される．Ⅳ.1. で示したように再結合の水撃作用により大きな水圧上昇を生じ，これはさけなければならない．したがって，吸出管静圧がいくらになると水柱分離を生ずるのかを知る必要がある．また不幸にして分離したら再結合の際の水圧上昇値は(13)式が成立するであろうか。

長い吸出管をもった水車で水柱分離を発生させないためには案内羽根閉鎖時間を長くすればよい訳だが，実際には水車の速度上昇から制限を受ける．このような場合には空気を吸入することによって水撃作用をなくす．このことを実験によって確かめ，必要な空気量をみつける。



第5図　実験装置　(1)
Fig. 5.　Test plant (1)



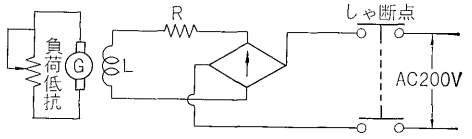
第6図　実験装置　(2)
Fig. 6.　Test plant (2)

以上より次の目的にそった実験を行なった。

1)　導びかれた近似計算式の信頼性を確かめる。
2)　水柱分離が発生するときの吸出管静圧を求める。
3)　再結合による水圧上昇値を求める。
4)　水撃作用をさけるための給気の影響を調べ，必要な給気量を求める。

2. 実験装置と実験方法

当社新水力実験室の水車効率試験設備を利用し，n_{ST}=115m-kW のフランシス形ポンプ水車模型により落差約 4.5m で実験した．この装置の配置図を第 4 図に，試験装置の写真を第 5，6 図に示す．吸出管は内径 300 mm で水車より 100m，60m 配管し下部タンクに流れ去る．上部吸出管部分は透明なアクリル樹脂でできており，水柱分離の状態が観察できるようになっている．案内羽根開閉は油圧サーボを用い，油圧および絞りを変えて閉鎖時間を変えた．負荷しゃ断は 1 個の電磁開閉器で行ない直流発電機の励磁電源のしゃ断，案内羽根油圧サーボの電磁弁動作およびしゃ断パルスを出すようになっている．発電機のしゃ断点を第 7 図に示す。



第 7 図　発電機のしゃ断器

Fig. 7.　Shut off point

給気試験は案内羽根サーボと直結した電磁弁の開閉により給気し，その空気量は空気タンクの圧力変化より求め，空気量の調節には空気タンクの容積と給気時間を変えて行なった。

水圧上昇の測定は 1,000% まで測定可能な圧力ヘッドを使用し第 4 図の各点について測定した．流量は圧力変動の比較的少ない吸出管末端付近に円筒ピトー管をそう入し，差圧変換器により測定した．しかし実際には変換器が圧力変動や流れの乱れをも検出したためリップルが多いので出力回路に時定数 0.15 sec のフィルタをそう入してある。

実験方法は任意負荷において負荷しゃ断を行ない水圧管，吸出管の水圧上昇，案内羽根ストローク，水車回転数，流量変化などをオシロに記録した。

閉鎖時間を順次短かくすることにより水圧上昇は大きくなり，ついには水柱分離を起こす．この水柱分離の発生は上部吸出管アクリル部での観察と水圧上昇の不連続性より判定した。

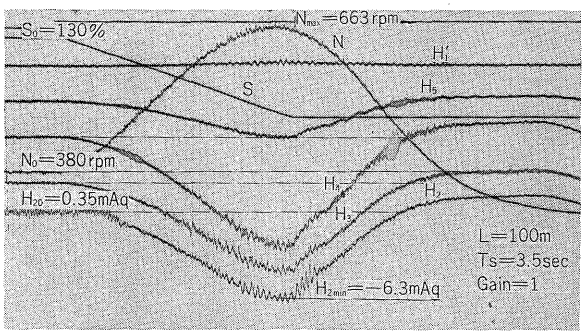
吸出管長さの影響をみるため，60m，100m の 2 種類について試験を行なった．試験項目を第 1 表に示す。

給気試験は L_2=100 m，負荷 130%，回転数 100%，

第 1 表　水柱分離試験項目

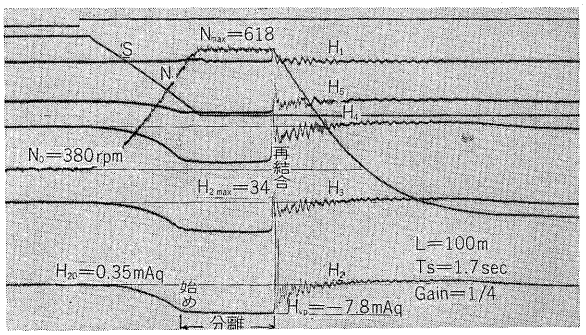
Table 1.　Test items

負　荷　(%)	50, 100, 130
回 転 数　(%)	100, 112, 125
吸出管長さ　(m)	60, 100



第 8 図　過渡現象（水柱分離しない場合）

Fig. 8.　Results of transient phenomena without water column separation



第 9 図　過渡現象（水柱分離した場合）

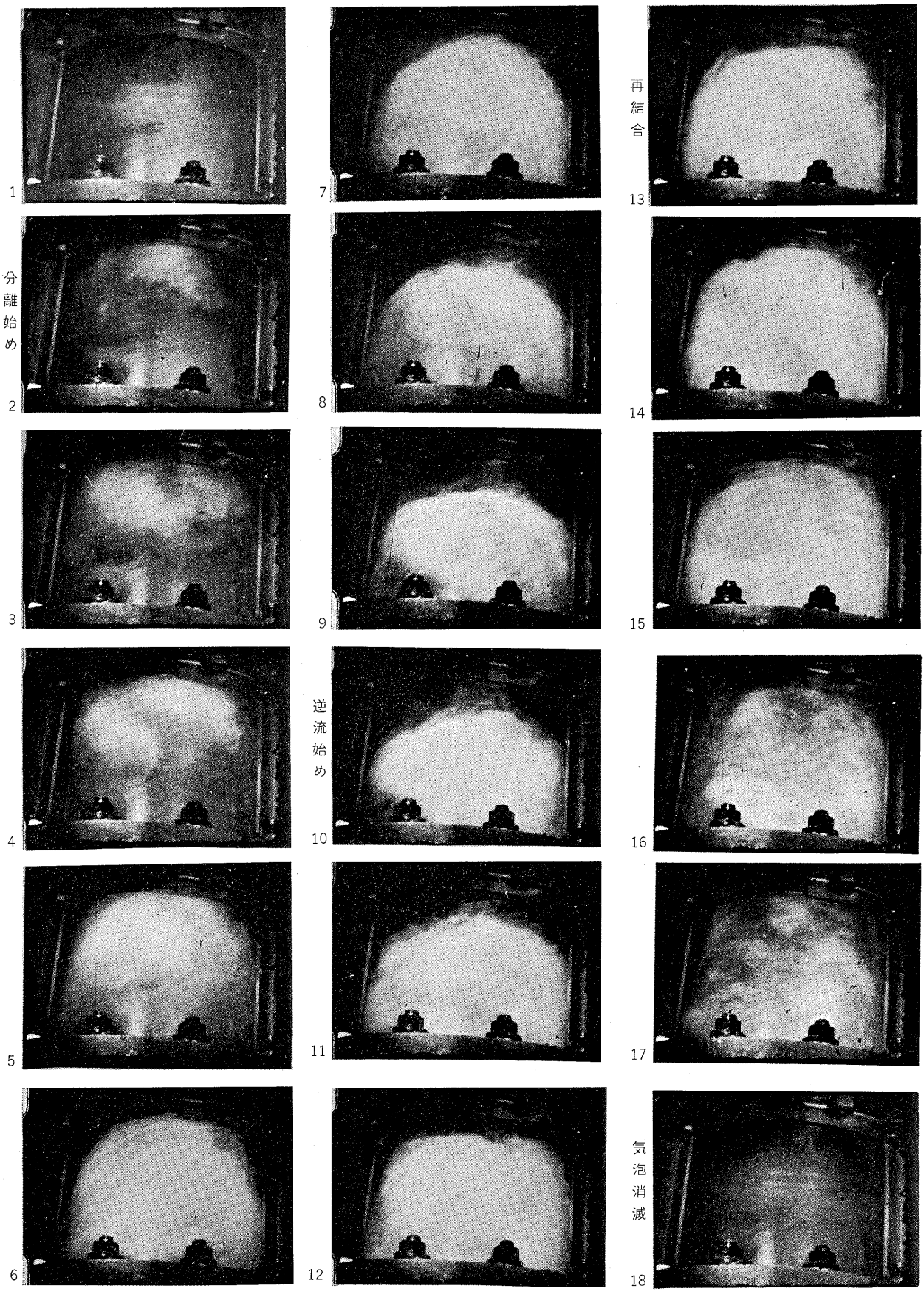
Fig. 9.　Results of transient phenomena with water column separation

閉鎖時間 1.5 秒一定で給気量を種々変えて行なった。

3. 実 験 結 果

前述の方法により実験した結果のオシロの一例を第8，9 図に示す．第 8 図は L_2=100 m，負荷 130%，定常運転条件 n'_1=90rpm，Q'_1=236 l/s で案内羽根閉鎖時間 T_S=3.5 秒の場合で水柱分離を起こしていない．図中 H'_2, H'_3, H'_4 はそれぞれ第 4 図に示した測定個所の静圧である．水圧管水圧上昇 H'_1 は水圧管が非常に短かいためほとんど影響を受けていない．第 9 図は T_S=1.7 秒とした場合で水柱分離を起こしている．この分離の発生状態を示したのが第 10 図である．2 点でランナ出口あたりから分離が起こり始め，段々成長して 9 点まで伸びる．10 点で分離した水柱は逆流を開始し 13 点で再結合し，その水撃作用により大きな衝撃音とともに装置全体が振動する．このときの最大水圧は H'_2=34 m を示している。

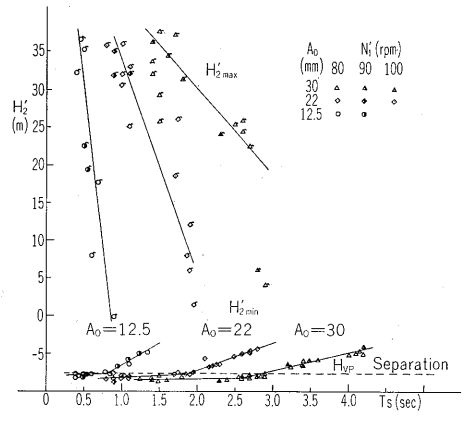
吸出管長さ L_2=100 m のときの吸出管内最大静圧と最低静圧を示したのが第 11 図である．図には負荷 130% (a_0=30 mm)，100% (a_0=22 m)，50% (a_0=12.5 mm) の過渡現象をまとめて示してある．各負荷についてしゃ断前運転時の回転数 n'_1 をいろいろ変えて実験したが，ほとんど現象に相違がみられない．T_S が減少するとともに静圧 H'_2 は比例的に減少し，ある静圧になると水柱分離を生じ，その後の静圧はほとんど一定となる．この水柱分離を起こす静圧はしゃ断前運転条件に関係なく



第 10 図　水柱分離状態　　Fig. 10.　Conditions of column separation

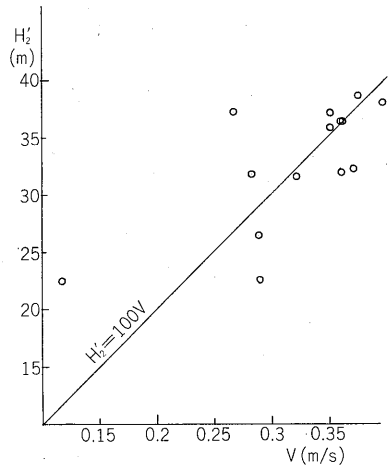
$H_{vp}=-7.8$ m である．これは含有空気の放出と水車出口の旋回流により高めの値を示していると思われる．また再合の水撃作用による水圧上昇は運転条件に関係なく水柱分離の大きい程（すなわち逆流速度が大きい程）高い値を示している。

この再結合の際の水圧上昇値と再結合直前の逆流速度との関係を示したのが第 12 図である．流速の測定が流れの乱れと圧力変動により，また水圧上昇値もオシロよ



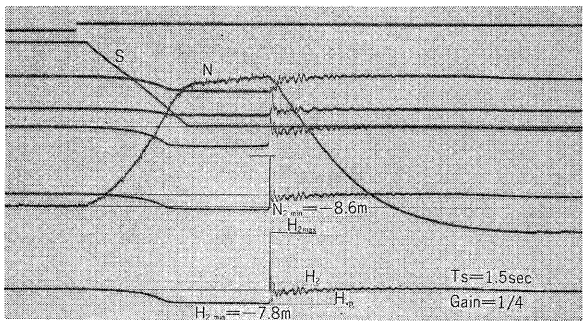
第 11 図　吸出管最大・最低静圧

Fig. 11.　Results of pressure rise in draft tube



第 12 図　水圧上昇と逆流速度（再結合時）

Fig. 12.　Relation of pressure rise with reverse velocity at rejoin

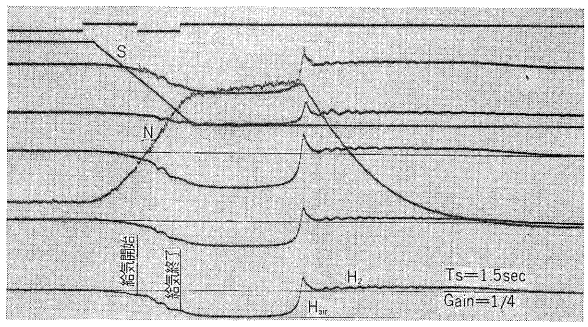


第 13 図　給気しない場合の過渡現象

Fig. 13.　Results of transient phenomena without air admission

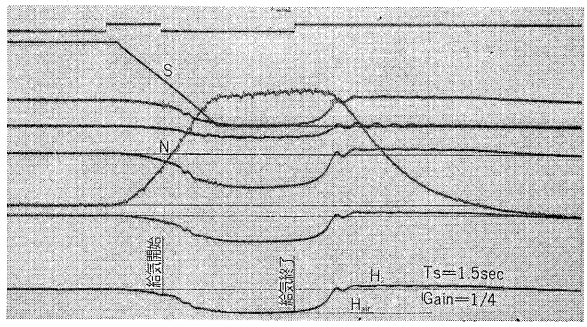
りの読取りのため正確さは失なわれているが，ほとんど流速の 100 倍となっている。

給気試験結果を第 13，14，15 図に示す．このオシロは静圧の倍率を第 14，15 図では第 13 図の 1/2 にしてある第 13 図は給気しない場合で，再結合の際非常に大きな水圧上昇値を示している．しかし第 15 図に示したように給気すると水撃作用はまったくなくなって，振



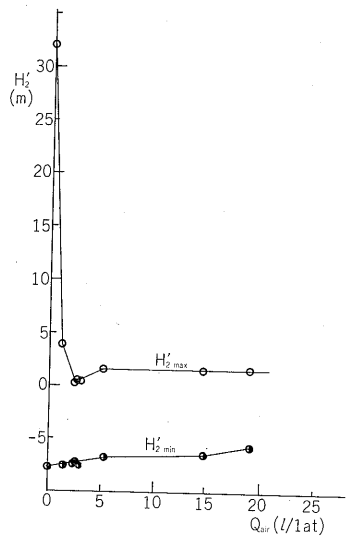
第 14 図　給気した場合の過渡現象

Fig. 14.　Results of transient phenomena with air admission



第 15 図　給気した場合の過渡現象

Fig. 15.　Results of transient phenomena with air admission



第 16 図　給気の影響

Fig. 16.　Air admission test results

動，衝撃音もない．給気量が少ないと第 14 図に示すように再結合による水撃作用はわずかに見られるが振動，衝撃音は少ない．このことより水撃作用を防止するのに給気は非常に有効であることがわかる．給気に必要な空気量を求めるため給気量を変化させたときの現象を第 16 図に示す．図からわかるように必要な空気量は本実験装置の場合約 3 l/1 at であった。

VII.　実験結果と計算結果の比較

V．の計算を電子計算機を用いて解いた．計算に際し次の変更を行なっている．模型水車性能曲線は等効率線が非常に不連続で計算に不都合を生ずるため滑らかな等

効曲線とし $Q'_1=f_1(n'_1, a_0)$, $\eta_m=f_2(n'_1, a_0)$ に入れた．実験装置の GD^2 は，

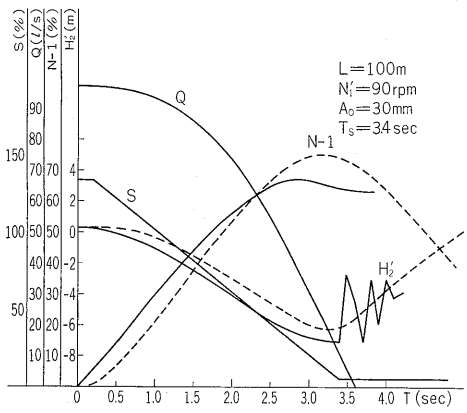
$$GD^2=4g\cdot I=21.7\text{〔kg}\cdot\text{m}^2\text{〕}$$

ここで I=(ダイナモの I)+(水車ランナの I)=0.554〔kg・ms²〕

水柱分離を起こしていない場合の計算結果を第 17 図に示す．図中点線は実験結果を示す．実験結果は第 8 図に示した通り振動が多いのでその平均曲線を示してある．第 17 図からわかるように速度上昇率，吸出管圧力降下ともに時間的遅れはあるが良く一致している．この計算結果と実際結果との時間的遅れは第 7 図の発電機しゃ断点に示した回路では時定数=$L/\Sigma R$=約 0.3 秒をもつためである．圧力変化の計算値が大きめの値を示しているのはⅢ．の仮定による。

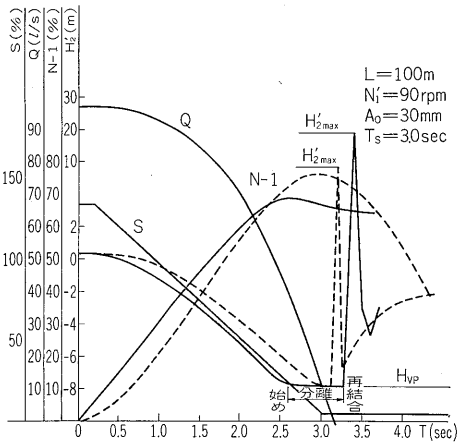
水柱分離を起こし始めの現象を第 18 図に示す．再結合の際の水圧上昇値はこの程度の分離では小さく実験結果で 8.0m，計算結果で 19m である．完全に分離したときの結果を第 19 図に示す．水圧上昇の計算結果が大きな値を示しているのは逆流速度が計算では大きなためである．これは管摩擦損失を無視したことと分離個所が垂直な上部吸出管部分であるにかかわらず計算は垂直部分を無視し吸出管は水平であると仮定しているため水柱分離の距離が大きめに計算されたことによる。

給気した場合の計算結果を第 20 図に示す．Ⅲ．の仮定のため分離した水柱が逆流し始めてからの圧縮過程に若干の差はあるが給気による現象をみるのにも近似計算が有効であることがわかる。



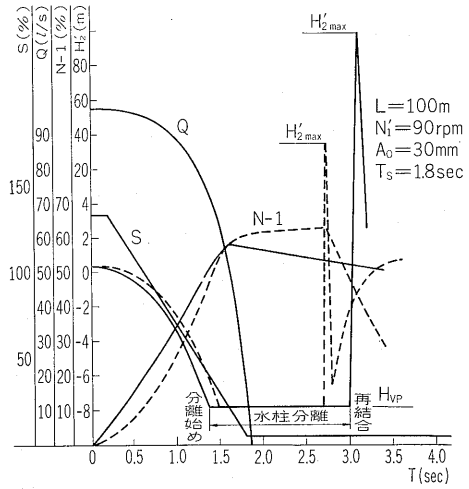
第 17 図　過渡現象計算結果 (1)

Fig. 17. Computed results of transient phenomena



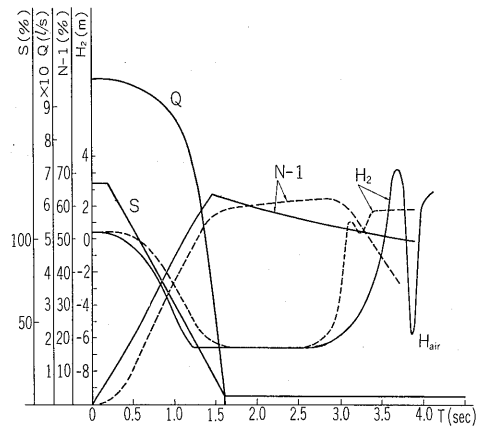
第 18 図　過渡現象計算結果 (2)

Fig. 18. Computed results of transient phenomena



第 19 図　過渡現象計算結果 (3)

Fig. 19. Computed results of transient phenomena



第 20 図　給気した場合の過渡現象計算結果

Fig. 20 Computed results of transient phenomena with air admission

VIII. むすび

実験から次の結果が得られた．1) 水柱分離は吸出管内静圧が $H_{vp}=-7.8$ m 以下で発生する．2) 分離した水柱が再結合の際，水圧上昇は逆流速度の約 100 倍の大きな水撃作用となる．3) 分離する可能性のある場合には給気することにより水撃作用はまったくなくなる。

吸出管内の過渡現象を調べるのに，導びかれた近似計算でも充分信頼できることが実験から確かめられ，今後の水車，ポンプ水車の設計に利用できる。

参考文献

(1) V.L. Streeter; Hydraulic Transients, 2, 19 (1967)
(2) W. H.Li; Mechanics of Pipe Flow Following Column Separation, Journal of ASCE, EM 4 (1962)

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。