

# ポンプを含む比較的長い管路の出口弁閉鎖による 水撃の予測について

吹田 年\*, 川又 正昭\*, 中村 寿\*\*

(昭和54年9月8日受理)

Prediction of Water Hammer which is caused by a Valve Closure at  
Outlet on a Comparatively Long Pipe Line with a Pumping System.

MINORU SUITA, MASAACKI KAWAMATA and HISASHI NAKAMURA

**Abstract:** - In this paper we deal with water hammer which is caused by a valve closure at outlet on a comparatively long pipe line with a pumping system. Water hammer on a pipe line with a pump at upstream end, is computed by the characteristics method with a digital computer. In addition, we calculate oil hammer for heavy oil pipe line problems.

As a result, the experimental values agreed well with the calculated values. Further, a similar tendency was seen between pressure head due to oil hammer and pressure head due to water hammer.

Hence it is seen that the theoretical analysis used for this study, which includes actual properties for a pump and a valve etc., can apply for the predictive calculations of water hammer and oil hammer in other pumping systems.

## 1. ま え が き

本研究においては、ポリユートポンプが比較的長い管路の入口に接続されており、その管路の末端で弁を閉鎖する場合の水撃を取扱う。工業的には原油基地、製油所などの貯油タンクへ、シーバースへ停泊したタンカーから原油を海上または海底に敷設された管路を通じ揚油する場合などが相当する。使用する管路は比較的長いものであるが、いわゆる遠距離輸送管路<sup>(1),(2),(3)</sup>に比べれば短いものであり、非正常現象の問題のなり方も異っている。従来ポンプを含む管路で問題とされたところは多くは停電時の水撃<sup>(1)~(7)</sup>であり、この場合ポンプの吐出弁の操作が問題とされた。本研究で対象とする管路末端の弁の操作にふれたものは少ない<sup>(1),(8)</sup>。

本報においては  $L/D=2000\sim3000$  ( $L$ : 管路長,  $D$ : 管の内径) の吐出管路をもつポンプ管路系において管路末端の弁の閉鎖による圧力上昇を、弁の閉鎖時間、

弁の特性、ポンプの特性、管路損失などを考慮し、水を用い特性曲線法により計算を行った。この結果を実験により検討したところ両者にはよい一致が見られた。油についてはポンプの性能、圧力波の伝ば速度などは実験により求め、油撃については計算により検討した。

記号

$a$ : 管内の圧力波の伝ば速度

$B$ : 管路定数  $= \frac{aV_0}{gH_0}$

$D$ : 管の内径

$F$ : 無次元時間  $s$  の関数

$f$ : 管摩擦係数

$g$ : 重力の加速度

$H$ : 水頭

$H_0$ : 管路入口における初期水頭

$h$ : 無次元水頭  $= \frac{H}{H_0}$

\* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

\*\* 動力炉・核燃料開発事業団 (東茨城郡大洗町成田町)

$$h_f: \text{無次元管摩擦損失} = \frac{fLV_0^2}{2gDH_0}$$

$k_1, k_2, k_3$ : ポンプの  $h-v$  曲線における係数

$L$ : 管路長さ

$N$ : 管路長さの等分数

$N_s$ : ポンプの比速度

$P$ : 圧力

$Q$ : 流量

$Q_0$ : 初期流量

$$q: \text{無次元流量} = \frac{Q}{Q_0}$$

$R_e$ : 管路のレイノルズ数

$$s: \text{無次元時間} = \frac{t}{T_c}$$

$t$ : 時間

$$t': \text{無次元時間} = \frac{t}{2L/\alpha}$$

$T_c$ : 弁の閉鎖時間

$V$ : 流速

$V_0$ : 初期流速

$$v: \text{無次元流速} = \frac{V}{V_0}$$

$x$ : 管路の長さ方向の座標

$$x': \text{無次元座標} = \frac{x}{L}$$

$\gamma$ : 流体の単位体積重量

$$\theta: \text{無次元時間} = \frac{t}{2L/\alpha}$$

$$\xi: \text{弁の瞬間閉鎖による上昇水頭} = \frac{\alpha V_0}{g}$$

添字

$i$ : 格子点の長さ方向の分割点番号

$j$ : 格子点の時間軸方向の分割点番号

## 2. 理 論

### 2.1 基礎方程式

管路の弾性および水の圧縮性を考慮し、一次元で取扱う。非定常流れにおける管摩擦係数は、定常流れにおけるもので近似できるものとする。管路は水平に置かれているものとし、微小項を省略し、無次元形で表わされた運動方程式、連続式は、

$$h_{x'} + h_f v |v| + \frac{B}{2} v_{x'} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h_{t'} + 2B v_{t'} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、添字は偏微分を表わす。

### 2.2 特性曲線法

式(1), 式(2)を用い特性曲線法<sup>(1)</sup>で計算を行う。圧力波の伝ば速度に比べて流速は省略できるものとし、Fig. 1に

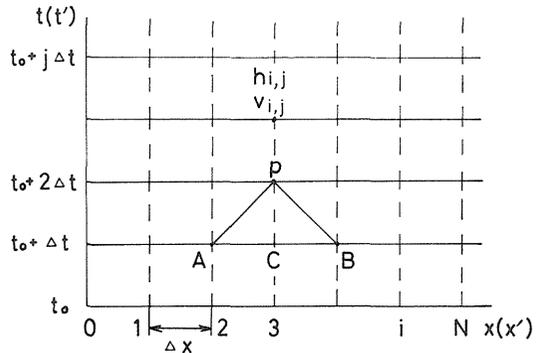


Fig. 1 Distance-time grid.

示すような  $x, t$  に対する格子網を考えれば、式(1), 式(2)は次のような2組の常微分方程式に書きかえられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh}{dt'} + B \frac{dv}{dt'} + 2h_f v |v| &= 0 \\ \frac{dx'}{dt'} &= 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dh}{dt'} - B \frac{dv}{dt'} - 2h_f v |v| &= 0 \\ \frac{dx'}{dt'} &= -2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式(3), 式(4)を Fig. 1 を参照して差分方程式で近似すれば、

$$\left. \begin{aligned} h_P - h_A + B(v_P - v_A) + 2h_f v_A |v_A| \Delta t' &= 0 \\ x'_P - x'_A &= 2(t'_P - t'_A) \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} h_P - h_B - B(v_P - v_B) - 2h_f v_B |v_B| \Delta t' &= 0 \\ x'_P - x'_B &= -2(t'_P - t'_B) \end{aligned} \right\} (6)$$

式(5), 式(6)により Fig. 1 の網目の  $(i, j)$  の点における  $h, v$  は次のように求められる。

$$h_{i,j} = \frac{1}{2} \left[ (h_{i-1,j-1} + h_{i+1,j-1}) + B(v_{i-1,j-1} - v_{i+1,j-1}) - 2\Delta t' h_f \{ |v_{i-1,j-1}| |v_{i-1,j-1}| - |v_{i+1,j-1}| |v_{i+1,j-1}| \} \right] \dots \dots \dots (7)$$

(  $i = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$  )

$$v_{i,j} = \frac{1}{2} \left[ v_{i-1,j-1} + v_{i+1,j-1} + \frac{1}{B} (h_{i-1,j-1} - h_{i+1,j-1}) - \frac{2}{B} \Delta t' h_f \{ |v_{i-1,j-1}| |v_{i-1,j-1}| + |v_{i+1,j-1}| |v_{i+1,j-1}| \} \right] \dots \dots \dots (8)$$

(  $i = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$  )

式(7), 式(8)は何れも  $i=0$ ,  $i=N$  に対しては使用できない。 $i=0$  に対しては式(6)だけ,  $i=N$  に対しては式(5)だけしか使用できないので, これらの点における  $h$ ,  $v$  を決めるためには他の条件が必要である。 $i=0$  すなわち管路の上流端はポンプに接続されており,  $i=N$  すなわち管路の下流端には弁が取付けられている。

境界条件

(1)  $i=0$  に対しポンプの性能曲線を実験的に調べ,  
 $h_{0,j} = k_1 + k_2 v_{0,j} + k_3 v_{0,j}^2 \dots \dots \dots (9)$   
 と表わす。

(2)  $i=N$  に対しては管路出口における流速変化を弁の閉鎖特性に応じて求め,  
 $v_{N,j} = F(s) \dots \dots \dots (10)$   
 と表わす。

式(6)と式(9)により,

$$v_{0,j} = \frac{(B - k_2) - \sqrt{(k_2 - B)^2 - 4k_3(k_1 - h_{1,j-1})}}{2k_3 + Bv_{1,j-1} - 2h_f v_{1,j-1} |v_{1,j-1}| \Delta t'} \dots \dots (11)$$

式(5)と式(10)により,

$$h_{N,j} = h_{N-1,j-1} - B(v_{N,j} - v_{N-1,j-1}) - 2h_f v_{N-1,j-1} |v_{N-1,j-1}| \Delta t' \dots \dots (12)$$

2.4 水撃による上昇水頭成分

式(12)における  $h$  は,  $h = H/H_0$  であって,  $H$  には初期水頭  $H_0$  を含む。よって  $h$  を水撃の影響による上昇水頭成分と静圧の和として表わし, 水撃を生じたための上昇水頭の成分を見出す。静圧を見出すため, 管内流れは非定常変化を行うが, 無限に長い時間かかって変化したものと

と仮定して計算を行う。この場合計算は圧縮性を考えない剛体理論となる。このようにして静圧変化を推定するのはギブソン量水法の計算で用いられるところである。<sup>(9)</sup> 簡単のため管路入口を添字 1 で, 出口を添字 2 で表わす。エネルギー式により,

$$\frac{P_2}{\gamma} = \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \frac{V_2^2}{2g} - f \frac{L}{D} \frac{V_1^2}{2g} \dots \dots \dots (13)$$

$V_1 = V_2$  であるから

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - f \frac{L}{D} \frac{V_1^2}{2g} \dots \dots \dots (14)$$

よって水撃による上昇水頭  $\Delta H_2$  は管出口において

$$\Delta H_2 = H_2 - \left( \frac{P_1}{\gamma} - f \frac{L}{D} \frac{V_1^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (15)$$

これらの関係は Fig. 2 に表わされている。なお  $\Delta H_{2m}$  は  $\Delta H_2$  の最大値を表わす。

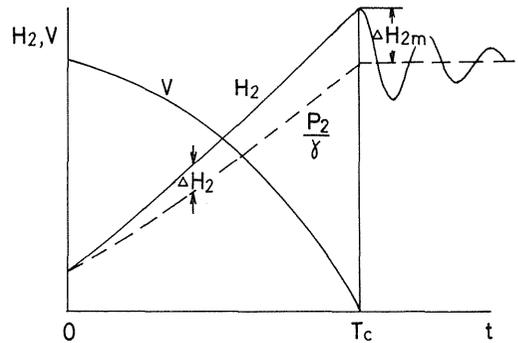


Fig. 2 Curves of pressure and velocity versus time.

3. 実験装置および実験方法

Fig. 3 に実験装置の概略を示す。地下の貯水そうの水はポリアートポンプにより揚水され, 水平に設置された管路を通り出口のニードル弁を経て地下水そうに戻る。ニードル弁直前に電磁流量計を置き, 圧力測定用ピックアップはポンプの吐出弁直後とニードル弁直前に取付けた。ピックアップは歪ゲージ式圧力変換器であり, 歪計を経て電磁オシログラフに記録した。供試管路には内径 5.29 mm, 長さ 14.94 m と 10.31 m の垂鉛引鋼管を使用した。管路の継手には空気がたまらないように, 継手内部で両者の管が密着するように配慮した。供試ポリアートポンプは 50×50 の片吸込式であり, これに電気動

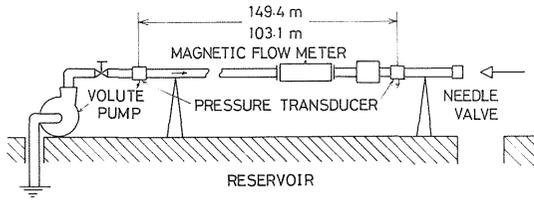


Fig. 3 Schematic diagram of the apparatus.

力計を接続した。電磁流量計および圧力計は何れも検定して使用した。管路末端のニードル弁は油圧装置にカム板を併用して駆動した。Fig. 4 にカム板を用いた油圧装置を示す。カム板は Fig. 5 に示す弁の閉鎖形式となることを考え、各々の形式に対し一枚宛計3枚を用意した。Fig. 5 において①の形式は弁の閉鎖時間に対し流量(速)比が上に凸になる特性をもつ。②の形式は流量(速)比が弁の閉鎖時間に対し直線となるものであり、③は下に凸となる閉鎖形式である。Fig. 6 は3種類のカム板により実際に得られた流速変化を示したものである。③の形式はカム製作の誤差により予想の形式と変ったが、実験にはこれを使用した。次の式は供試カム板による流速変化を表わす実験式である。

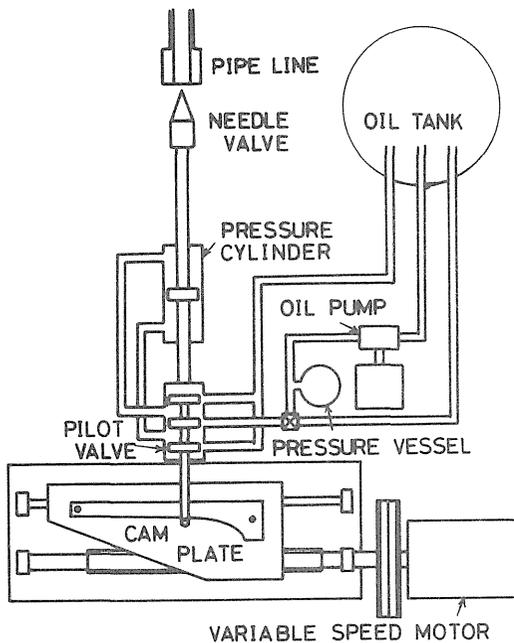


Fig. 4 Schematic diagram of valve operating system.

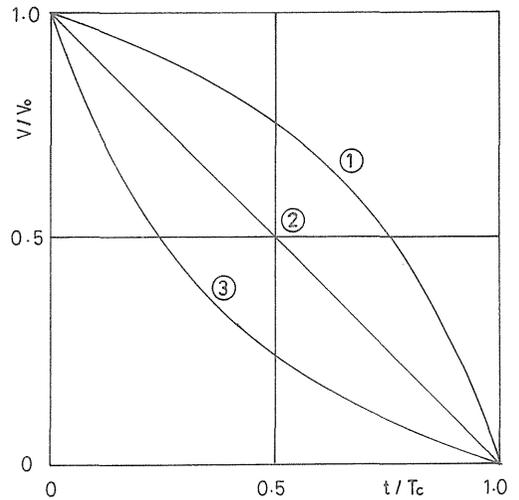


Fig. 5 Closure types of the valves (theory).

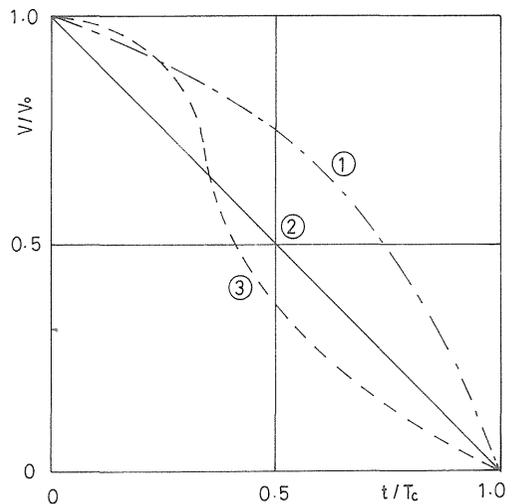


Fig. 6 Closure types of the valves (actuality).

$$\begin{aligned}
 v &= -0.5295 + \frac{1}{2} \sqrt{1.059^2 - 4(s^2 + 1.059s - 2.059)} \\
 &= F_1(s) \dots\dots\dots (16) \\
 v &= 1.00 - s = F_2(s) \dots\dots\dots (17) \\
 v &= 0.7065 + \frac{1}{2} \sqrt{1.413^2 - 4(s^2 - 0.042s + 0.413)} \\
 &= F_3(s) \\
 &\quad (0 \leq s \leq 0.3) \\
 v &= 1.0215 - \frac{1}{2} \sqrt{2.043^2 - 4(s^2 - 2.721s + 1.721)} \\
 &= F_3'(s) \\
 &\quad (0.3 \leq s \leq 1.0)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

ここで  $v = v_{N,j} = V/V_0$ ,  $s = t/T_0$  である。式(10)は Fig. 6 における形式①に対するもの、式(11)は②に対するもの、式(12)は③に対する流速変化を表わしている。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 供試管路の管摩擦係数, 圧力波の伝ば速度

Fig. 7 に供試管路の定常流における管摩擦係数  $f$  と

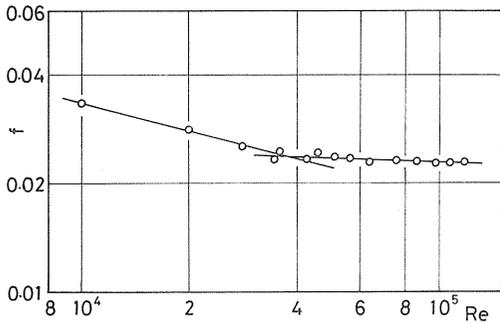


Fig. 7 Pipe friction coefficient for steady flow.

レイノルズ数  $Re$  との関係を示す。図より 13 点のレイノルズ数に対する  $f$  の値を読みとり数表化して計算に用いた。中間のレイノルズ数に対してはラグランジュの補間法により  $f$  の数値を求めた。

また圧力波の伝ば速度は、供試管路の末端のニードル弁を急閉鎖することにより得られる圧力波形より求めた。その結果、水に対する圧力波の伝ば速度の平均値は、 $1255\text{m/s}$  であった。また A 重油 ( $7.0^\circ\text{C}$ , 比重  $0.85$ , 粘度  $0.811\text{P}$ ) に対しては  $1204\text{m/s}$  であった。

##### 4.2 供試ポリュートポンプの性能曲線

Fig. 8 に水および A 重油を用いたときの供試ポリュートポンプの、実験により得られた性能曲線を示す。A 重油を用いたときは、水の場合より揚程は下がり、効率も下がる。軸動力は逆に増加する。また Fig. 9 は供試ポンプの揚程—吐出量曲線を無次元表示したものである。Fig. 9 においては供試ポンプの最高効率点における吐出水頭と流速を用いて無次元化している。この図により水の場合に対し式(9)の実験定数は、 $k_1 = 1.230$ ,  $k_2 = 0.04020$ ,  $k_3 = -0.2703$  と求められた。また図によれば水と A 重油の曲線は  $V/V_0$  の小さいときわずかに離れるが、かなり近い曲線となっている。このことから揚

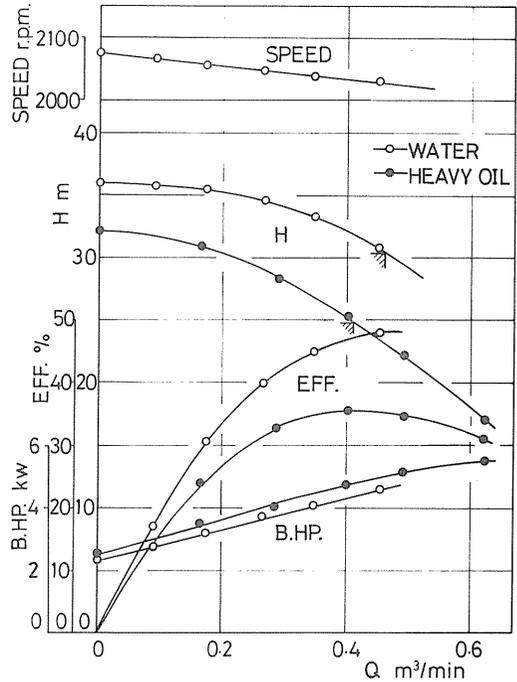


Fig. 8 Characteristic curves for the volute pump.

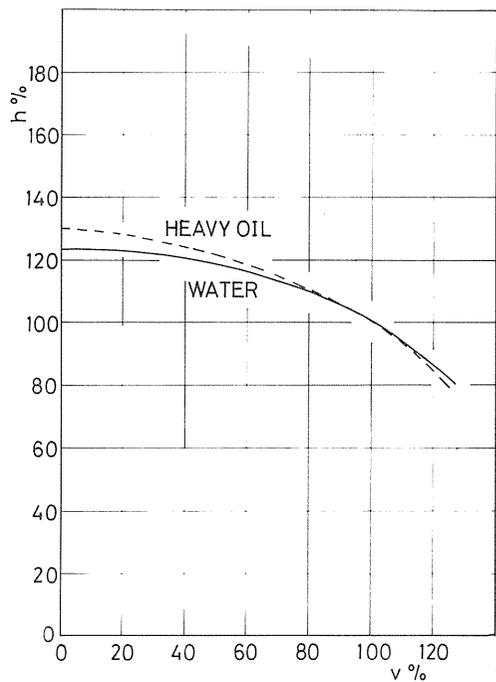


Fig. 9 Dimensionless head and dimensionless velocity for the volute pump.

油時の供試ポンプの無次元特性を揚水時の特性で、概算に対しては、近似できるものと考えた。

4.3 市販の弁の閉鎖特性

Fig. 10 は市販の2インチの、スルース弁、バタフラ

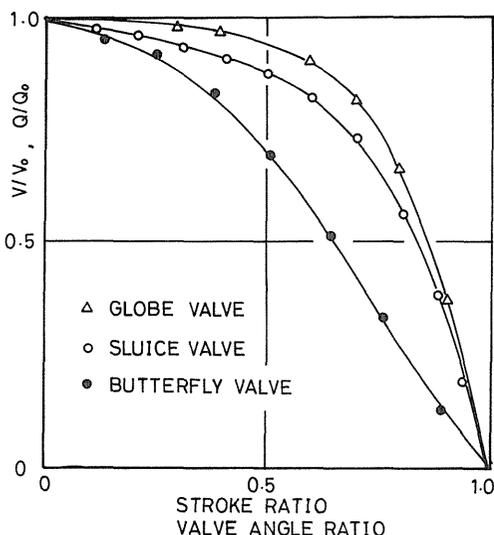


Fig. 10 Closure curves for the market valves.

イ弁、玉形弁の定常流における弁の開度に対する流量特性を示す。図の横軸はスルース弁、玉形弁においては、全閉までの弁棒の変位を1として表わし、またバタフライ弁においては、全閉までの弁棒の回転角度を1として表わしている。この図によれば、この3種類の弁の閉鎖特性は何れも前述した閉鎖形式①に相当している。ただし図中の $V_0, Q_0$ は弁全開時の流速、流量を表わしている。

4.4 弁を閉鎖するときの水頭—時間曲線

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 は、弁の閉鎖形式①, ②, ③に対するニードル弁直前における水頭上昇と時間の関係を計算、実験両面から示した例である。横軸には無次元時間 $\theta$ をとっている。何れも緩閉鎖である。図中の小円と破線は実験を表わし、実線は理論計算を表わしている。両者は何れもかなりよく一致している。

次に式(19)の $\Delta H_2$ の最大値 $\Delta H_{2m}$ を $\xi$ で割って無次元化し、横軸には弁の無次元閉鎖時間 $\theta$ をとって表わしたものがFig. 14である。図中の記号①, ②, ③は弁の閉鎖形式を表わし、直線は理論計算を、○, △は実験点を表わし

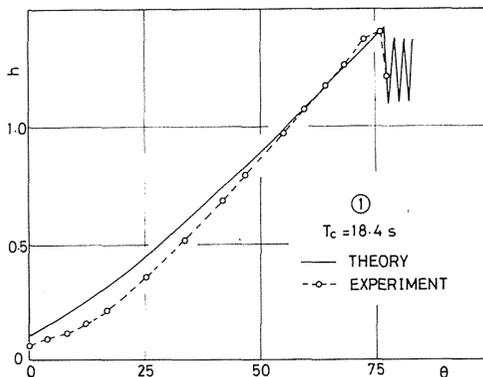


Fig. 11 Variation of pressure due to water hammer.

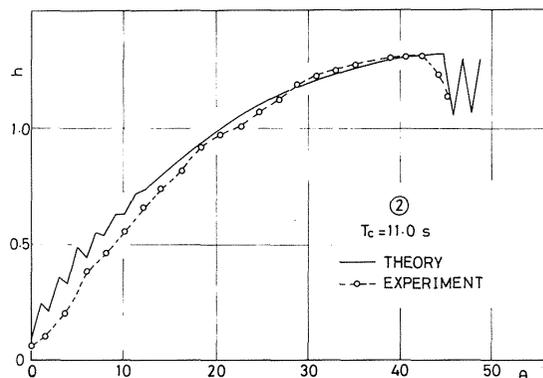


Fig. 12 Variation of pressure due to water hammer.

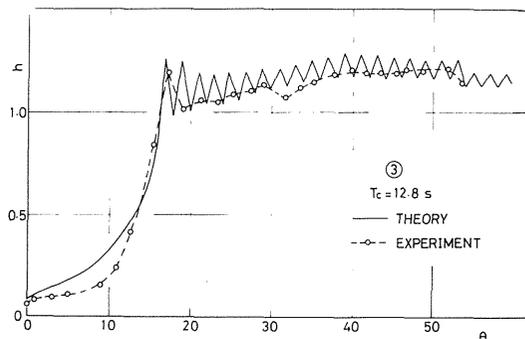


Fig. 13 Variation of pressure due to water hammer.

ている。両者はよい一致を示している。管路長さの影響は実験の範囲で表われていない。何れの弁閉鎖形式の場合も、弁閉鎖時間が長くなれば上昇水頭は減少し、両対数方眼紙上で直線の関係となる。弁の閉鎖形式の影響の大きいことは明白である。また①, ③の両形式共、②の

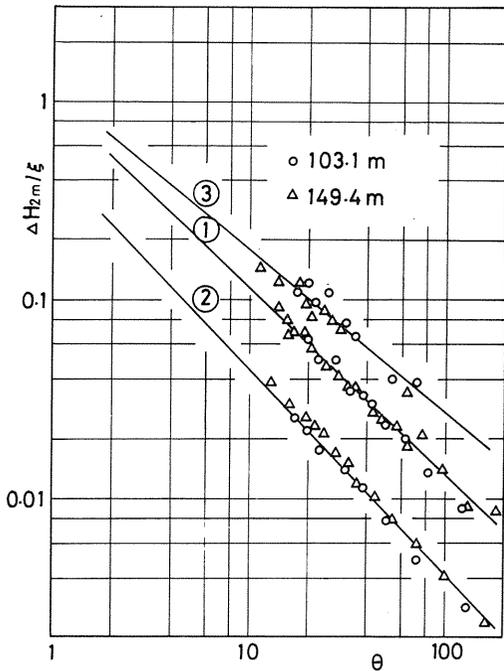


Fig. 14 Maximum pressure head due to water hammer.

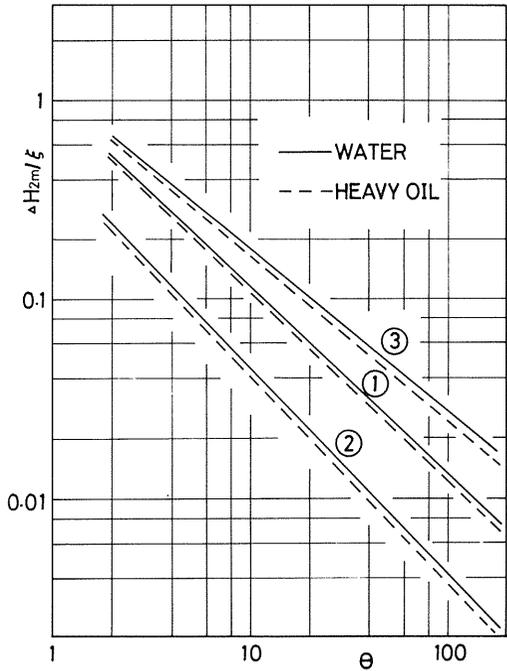


Fig. 15 Comparison of maximum pressure heads due to water hammer and oil hammer.

直線閉鎖の場合より大きい上昇値を示しており、注意を要する点である。

次にA重油を供試実験装置に流した場合を計算により検討した。用いた仮定は次のようである。

- (1) 管路入口の境界条件として Fig. 9の油の場合の揚程—流量曲線を使用する。
- (2) 管路出口の境界条件として水の場合の関係式(10)を用い、実際には式(10)~(13)で近似する。
- (3) 圧力波の伝ば速度, 単位体積重量, 運動粘性係数はA重油の数値を使用する。

計算結果の最大上昇水頭  $\Delta H_{2m}/\xi - \theta$  曲線を Fig. 15に示す。比較のため前述の水の場合も示してある。これによればA重油の油撃による圧力上昇は水に近いものである。ただし何れの場合も水より小さく、その差は  $\theta = 20 \sim 100$  において①の弁閉鎖形式の場合で5%程度である。

#### 4.5 使用するポンプの比速度の影響

本研究で対象としている管路は水平に近い状態に設置され、 $L/D = 2000 \sim 3000$  という点から管路の損失水頭は50~60m程度までと推定され、この程度の揚程に

対してはポリユートポンプを使用するの<sup>(10)</sup>が一般的と考えられる。そこで供試ポリユートポンプの比速度は104であるが、メーカーの協力により実用されているポリユートポンプの数台について揚程—吐出量曲線を調べた。Fig. 16はこの結果を示している。各ポンプの最高効率点における揚程, 吐出量を基準にとり無次元揚程—吐出量曲線として表わしてある。図に表われている  $N_s$  の範囲100~350はほぼポリユートポンプとして分類される<sup>(10),(11)</sup>ときの比速度の範囲に相当している。Fig. 16で比速度の小さいポンプの曲線が幾分下に出ているが、 $N_s$  の大きいものとの間で大きな差はない。従って検討の対象となるポリユートポンプの性能がはっきりしないときでも、他の性能曲線を用いて上昇水頭値の概算はできるものとする。

#### 4.6 考察

- (1) 本研究における弁の閉鎖は緩閉鎖領域で行われた。水撃による弁直前の最大上昇水頭は弁閉鎖途中、弁閉鎖形式①においては弁の閉鎖直前に現われ、②の場合は弁の閉鎖時間中はほぼ一定値を保ち、③においては弁閉鎖時間の途中で現われる。これらは流速変化率(減速度)  $dv/dt$  の最大になる時刻にそれぞれ現われる。

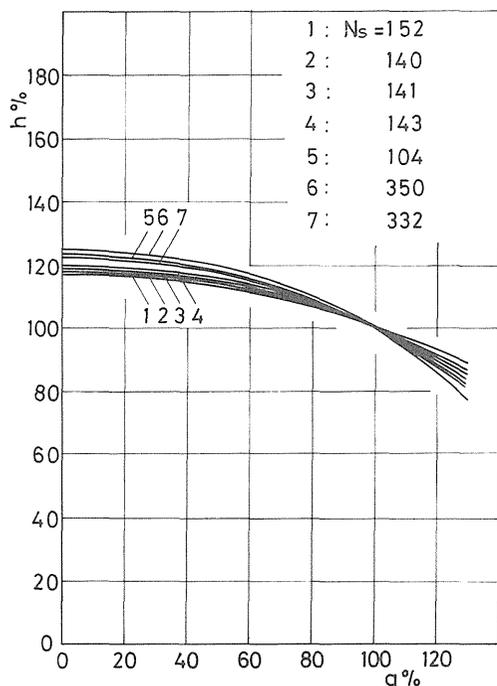


Fig. 16 Variation of  $h$ - $q$  curves with specific speed.

- (2) 弁の閉鎖形式については、①が実用の弁の流量変化を表わし得る形式と考えられる。③は実用の弁で一定送り条件が何らかの原因で変化した場合に起る流量変化に対応したものと考えられる。さて直線変化②の形式は、実用の弁においては実現の困難な閉鎖形式であるが、一般に弁の閉鎖特性を示す資料が少ないので、弁の閉鎖による水撃の計算を行う場合に、取扱いが簡単であるため多く用いられるものと考えられる。しかし水頭上昇値は  $\theta=5$  の場合、①は②の1.76倍に達し、③の場合は②の2.24倍の値を示す。従って弁の閉鎖による水撃を計算する場合に、直線閉鎖を使って概数を得ようとすれば、危険側の大きな誤差を含むことになり注意する必要がある。
- (3) 本研究で用いた特性曲線法による水頭および流速計算には、乱流の場合の流速の2乗比例の管摩擦損失を考慮している。Fig. 8によれば供試ポリュートポンプの最大吐出量は  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$  程度であるので、この  $1/6$  の  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$  の場合のレイノルズ数をA重油に対し供試管路の寸法で求めると、 $R_e=5000$  となる。よって供試管路でA重油は水と同様乱流の損失を示すものとして取扱うことができる。また原油についても

比重0.86程度のもは運動粘性係数はA重油に似ており、本研究の取扱いで計算できるものとする。

- (4) Fig. 9の供試ポンプの  $h$ - $q$  曲線、および式(9)の実験式は定常状態におけるものである。また式(10)の関係、ならびにFig. 10の市販の弁による実験も定常状態における結果である。これらは本来は非定常条件のもとで測定されるべきものであるが、簡単のため定常状態の測定により近似している。管摩擦係数  $f$  についても同様である。これらの点については前述のように計算結果と実験結果はほぼ一致しており、そのための誤差は小さいものとする。

## 5. 結 論

以上に述べたところを要約すると、

- (1) ポリュートポンプに比較的長い管路が接続されている場合、その出口弁の操作による水撃は特性曲線法による計算で、計算結果と実験結果はかなりよく一致する。
- (2) 出口弁の閉鎖曲線は、上に凸の弁閉鎖曲線で近似する必要がある。直線閉鎖で近似する場合は危険側の大きな誤差を含むことになる。
- (3) 管路にA重油を流す場合の弁の閉鎖による油撃の最大上昇値については、Fig. 15に示すように水に近いものである。

## 謝 辞

この研究を進めるに当って熱心に協力された当時の卒業研究の学生、桜井敏一君に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) Streeter V. L. and Wylie E. B., Hydraulic Transients, McGRAW-HILL (1967), 260
- (2) ストリーター, 竹中監訳, 流体過渡現象, 日本工業新聞社 (昭48), 297
- (3) Rich G. R., Hydraulic Transients, Dover (1963), 58
- (4) 小堀, 機械学会誌, 62-485 (昭34-6), 942
- (5) 機械学会, ポンプとその設備計画運転保守, 丸善 (昭37), 30

- (6) 星, 機械学会第243回講習会教材 (昭40), 73
- (7) 官代, 機械学会誌, 70-578 (昭42-3), 376
- (8) 原他2名, 石油パイプラインにおけるサージ現象, 流体工学, 13-5 (昭52-5), 257
- (9) 鈴木他1名, 機械学会誌, 63-493 (昭35-2), 47
- (10) 梶原, ポンプとその使用法, 丸善 (昭32), 15
- (11) 機械学会, 機械工学便覧(第6版) (昭52), 9-34
- (12) 中村他2名, 機械学会講演論文集(日立地方)(昭50-10), 77