技術論文

低圧戻り管路におけるサージ圧力の低減*

永田精一**

Reduction of Surge Pressure in Low Pressure Return Line

Kiyokazu NAGATA

To increase the operating speed of machines which use hydraulics, it is necessary to increase the flow rate of hydraulic systems. As flow rate becomes larger, it becomes increasingly important at the design stage to take into account fluid transients in the fluid lines. In particular, column separation in the low-pressure return line generates a high surge pressure causing an undesirable noise and possible damage to components.

A number of studies have already been made of this phenomena. In the actual development of hydraulic systems however, there are problems in which the check valves are installed in the return line, or one of a variety of valve stroke patterns is used. These problems have not been sufficiently dealt with in the previous studies.

To analyze fluid transient phenomena in the fluid lines, a simulation program which combines the method of characteristics with numerical integration was developed. The results of the calculations with the program were verified by a comparison with the experimental results. Using this simulation program, the effect of various parameters on the surge pressure in the low-pressure return line investigated. These parameters include line dimensions, void ratio, check valve position, pressure loss, and timing of the valve control. Furthermore, to reduce the surge pressure, the use of two check valves mounted in a circuit was proposed. The effect of this proposed idea was verified with the numerical method and by experiments.

1. 結 言

油圧装置が大型化され大流量で駆動されるようになると管路内での波動現象が無視できなくなる。特に低圧戻り管路部での液柱分離現象では、空洞消滅時にサージ圧力を発生し機器の破損や異常音をもたらす。この現象は油圧システムが多様されている建築機械や製鉄機械などにおいて問題となることがある。液柱分離に関しては、古くから水ポンプ系や各種パイプラインを中心として種々の研究が行われている^{(1)~(6)}。油圧装置に関しても、戻り管路の液柱分離を理論的に解明しようとする研究⁽⁷⁾や、サージ圧力を低減するための研究⁽⁸⁾が行われている。

しかし、低圧戻り管路中にチェック弁がある場合や切替弁操作を高速で繰り返した場合など、実際の油圧

回路に関する研究は少ない。さらに解析プログラムが汎用化されておらず、種々の回路について解析するには適用回路毎のプログラム開発に時間がかかるため、実際の問題解決にあたっては実験による試行錯誤的な検討が中心であった。

そこで、本研究では種々の管路問題を解析できるシミュレーションプログラムを開発し、これを利用していくつかの回路条件が低圧戻り管路のサージ圧力に与える影響を検討したほか、2つのチェック弁を持ったサージ圧力低減回路を提案する。

2. 主 な 記 号

a : 音速, A : 管路の断面積, Cd : 流量係数,
 D : 管路内径, D_o : オリフィス直径,
 F : 単位長さあたりの粘性摩擦損失圧力,
 K : 作動流体の体積弾性係数,
 K_{air} : 混入空気 の体積弾性係数,
 L : 管路長, L_c : チェック弁取り付け位置,
 P : 圧力, Q_o : オリフィス通過流量,

*平成3年1月15日 原稿受付

**カヤバ工業(株) 技術研究所

(所在地 〒228 神奈川県相模原市麻溝台1-12-1)

T : 油圧要素の数値積分計算における時間,
 t : 時間,
 ts : 回路 (管路) の計算における時間,
 T_0 : 弁閉止時間,
 T_1 : 弁切換え時間間隔, V : 流速,
 X_0 : 気泡混入率, C^+ : 前進波, C^- : 後退波,
 ΔT : 数値積分計算の時間刻み幅,
 Δts : 特性格子時間刻み幅, Δx : 管路分割長さ,
 ρ : 作動流体密度, ρ_{air} : 空気 の 密度,
 添字 A, B, C, R, S, P : 特性格子 上 の 位置 (Fig. 2参照)

3. シミュレーションプログラム

今回開発したプログラムはFig. 1に示すように、油圧要素と回路構成のデータを作成するプログラム、このデータを基に計算を実行するプログラム、さらにその計算結果のグラフ表示など後処理をするプログラムで構成されている。そして、これらのプログラムはすべてデータファイルで接続され、一連の計算処理が行える。

Fig. 1 Simulation program data flow

Fig. 2 Grid of characteristics.

プログラムに含まれる各種油圧要素の計算方法は多くの文献⁽¹⁰⁾に述べられているので、ここでは、管路とチェック弁の計算についてのみ簡単に説明する。

3.1 管路

管路部の計算法として規定時間間隔の特性曲線法⁽¹⁾を用い、粘性摩擦損失項の計算には香川らの提案した非定常粘性を考慮した高速計算法⁽⁹⁾を用いた。また、液柱分離に関しては空洞モデル⁽⁴⁾を用いた。管路部の特性式を以下に示す。

$$C^+ : \frac{1}{a}(P_P - P_R) + \rho(V_P - V_R) + \Delta ts F_R = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\Delta x = (V_R + a) \Delta ts$$

$$C^- : \frac{-1}{a}((P_P - P_S) + \rho(V_P - V_S) + \Delta ts F_S = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\Delta x = (V_S - a) \Delta ts$$

ここで、

$$V_R = \frac{V_C - a\theta(V_C - V_A)}{1 + (V_C - V_A)\theta} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$V_S = \frac{V_C - a\theta(V_C - V_B)}{1 - (V_C - V_B)\theta} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$P_R = P_C - \theta(V_R + a)(P_C - P_A) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$P_S = P_C + \theta(V_C + a)(P_C - P_B) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$F_R = F_C - \theta(V_R + a)(F_C - F_A) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$F_S = F_C + \theta(V_S + a)(F_C - F_B) \quad \cdots \cdots (8)$$

ただし、 θ は格子縦横比で

$$\theta = \Delta ts / \Delta x \quad \cdots \cdots (9)$$

で計算される。

なお、油中混入気泡の影響を考慮するため、油中音速を以下の式で計算している⁽¹¹⁾。

$$a = \frac{K K_{air}}{[\rho(1-X) + \rho_{air}X][K_{air} + (K - K_{air})]} \quad \cdots \cdots (10)$$

$$X = 1 - \frac{1}{1 + \frac{X_0(1-P/K_{air})}{(1-X_0)(1-P/K)}} \quad \cdots \cdots (11)$$

3.2 チェック弁

チェック弁のように内部の動的な挙動を考慮しなければならない要素の計算は、常微分方程式を管路の特性格子の時間間隔で差分化して計算する方法や刻み時間を一定にした数値積分法が従来から用いられている⁽¹⁵⁾。しかし、油圧要素は剛性系が多く精度よく計算するにはより小さな時間刻みを必要とするためこの方法では十分でないことがある。そこで、チェック弁のような動的要素は誤差評価をしながら自動的に時間刻み幅を変える数値積分法⁽¹²⁾を用いた。以下に、チェック弁の基礎式を示す。また、Fig. 3に概念モデルを示す。

Fig. 3 Check valve simulation model

$$m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + c_c \frac{dx_c}{dt} + k_c (x_{c0} + x_c) = f \quad \dots\dots(12)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{K(Q_1 - Q_{ch})}{W_{c1}} \quad \dots\dots(13)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{K(Q_{ch} - Q_2)}{W_{c2}} \quad \dots\dots(14)$$

$$Q_{ch} = C_d A_c \sqrt{2 |P_1 - P_2| / \rho} \operatorname{sgn}(P_1 - P_2) \quad \dots\dots(15)$$

ここで、 A_c :チェック弁開口面積、 c_c :減衰係数、 f :チェック弁ポペットに作用する力(圧力による力及び流体力)、 k_c :チェック弁ばね定数、 m_c :チェック弁ポペット質量、 P_1 :チェック弁上流圧力、 P_2 :チェック弁下流圧力、 Q_{ch} :チェック弁通過流量、 Q_1 :チェック弁上流に管路から流入する流量、 Q_2 :チェック弁下流から管路へ流出する流量、 W_{c1} 、 W_{c2} :チェック弁内容積、 x_c :チェック弁ポペット変位、 x_{c0} :チェック弁ばね初期設定たわみ量、である。

つぎに、このような数値積分法による要素の計算と特性曲線法による管路の計算の接続法について述べる。

3.3 管路と油圧要素の接続計算

数値積分法による油圧要素の計算では、管路との接続部を容量としてモデル化することにより、接続計算の標準化(サブルーチン化)を図れる利点もある。つまり、要素の計算における現時刻(T)に管路から接続部へ流れ込む流量(Q_1 、 Q_2)と要素内から接続部へ流れ込む流量(Q_{ch})の連続条件から数値積分により次の計算時刻(ΔT 後)の圧力(P_1 、 P_2)を求め、この圧力により次の時刻の管路からの流入流量と要素内での流用を計算する手順はすべての接続部で共通である。しかし、ここでの問題点は管路から油圧要素への流入流量を変化する積分刻み幅に合わせてどのように計算するかということにある。そこで、従来から、複数管

Fig. 4 Calculation flow chart

路の時間刻みの同期をとるために用いられている線形補間式(式(3)~(8))を流用し、管路の特性曲線が境界と交わる時刻を要素の数値積分計算における時刻と一致するようにした。このため、管路と要素の接続部における格子縦横比 θ は要素の計算における時間($T + \Delta T$)と管路の計算における時間(t_s)を用いて次式となるように設定した。

$$\theta = \{(T + \Delta T) - t_s\} / \Delta x \quad \dots\dots(16)$$

計算の流れをFig. 4に示す。

4. シミュレーションプログラムの実験による確認

低圧戻り管路上流で弁を高速に開閉すると液柱分離に伴うサージ圧力が発生する。このような場合、管路に絞りやチェック弁を挿入して液柱分離を防止することが行われる^{(5),(6)}。また、管路が長くなると途中で管路径が変化することもある。このような問題に対するプログラムの精度を確認するため、Fig. 5—(a), (b), (c)に示す戻り管路モデルに関して、実験結果との比較を行った。

まずFig. 5(a)に示す戻り管路上流の弁を急閉した場合に発生する液柱分離後のサージ圧力を計算し実験値と比較した。その結果、Fig. 6に示すように気泡混入率として実測値(実験開始時に上流弁を開いた時の波動周期から管路内音速を測定し、式(10)、(11)で気泡混

Fig. 5 Return lines tested

Fig. 6 Verification of calculated results for normal return line (Case of Fig. 5(a))

入率を0から少しずつ増加させ求めた音速と一致した時の値)により実験に近い値が得られた。

管路途中に異径管が挿入された場合 (Fig. 5(b)) とチェック弁が挿入された場合 (Fig. 5(c)) についても同様に実験と比較した。これらの場合も Fig. 7, Fig. 8に示すように実験値に近い結果が得られ、この計算プログラムにより種々の条件での検討ができると判断した。

Fig. 7 Verification of calculated results for line with various diameters (Case of Fig. 5(b))

Fig. 8 Verification of calculated results for line with check valve inserted (Case of Fig. 5(c))

5. 戻り管路に発生するサージ圧力

シミュレーション結果が実験とよく一致することが確認されたので、低圧戻り管路上流の弁切換えに伴うサージ圧力に各種パラメータが及ぼす影響をシミュレーションにより検討した。

5.1 気泡混入率

Fig. 9に Fig. 5(a)の試験回路における気泡混入率とサージ圧力の関係を示す。実験により気泡混入率が0.08~0.6%の範囲の値であることが推定されており、この範囲内でもサージ圧力が3倍近く異なり非常に大きな影響を受ける。したがって、液柱分離時のサージ圧力を実験的に検討する場合は気泡混入率を把握しておく必要がある。

5.2 弁切換え時間間隔 T_1

実際の油圧装置では弁の切換えが繰り返し行われることが多い。そこで、管路上流にある弁の切換えパターンを、Fig. 10のごとく想定し、弁が閉止してから再度開き始めるまでの時間 T_1 が、液柱分離後のサージ圧力

Fig. 9 Effect of void ratio on surge pressure

Fig. 10 Servo valve stroke pattern

Fig. 11 Effect of valve shut off interval on surge pressure

に与える影響を調べた。Fig. 11はこの弁切換え時間間隔 T_1 と弁直近におけるサージ圧力の関係を示している。この図から今回の回路では、ある切換え時間間隔でサージ圧力が最大となる。さらに、この最大となる

Fig. 12 Effect of line dimensions on surge pressure

Table 1. Effect of line dimensions on surge pressure

L [m]	D [m]	L/D ² [1/m]	velocity [m/s]	surge pressure [MPa]
17	1.9	471	5.29	1.72
34	2.687	471	5.29	1.72
17	1.9	471	6.17	1.80
34	2.687	471	6.17	1.80
17	1.9	471	7.05	1.85
34	2.687	471	7.05	1.85

時間間隔は流量が大きい程長くなる。これは、液柱が再結合する際の衝突速度に起因する。つまり、空洞が消滅する前に上流の弁が開放されると、下流から戻って来た流体（液柱）と弁から流入した流体が衝突することになりこの衝突速度が弁の切換え時間によって変化する。そして、間隔が十分長くなると弁が再び開く前に液柱分離再結合が終了してしまい、サージ圧力は一定値となる。以上から、弁切換えを高速で連続的に行なうと、そのタイミングにより通常より大きなサージ圧力を発生する場合があるといえる。

5.3 管路寸法

液柱分離後のサージ圧力と管路長及び管路内径の関

Fig. 13 Effect of orifice on surge pressure

 Fig. 14 Calculated results for line with check valve (Case Fig. 5(c), $L_c=4.8$ m, $T_0=1$ ms)

係をFig. 12に示す。ここで、管路寸法のパラメータとして(管路長)/(管路径)²を用いて整理した結果、今回の試験回路では、比較的流速が速く、他の条件が同一であれば、この値が大きいほどサージ圧力は小さくなる傾向を示した。また、その値が同じであればサージ圧力もほぼ同じになることが判明した。(Table 1) この理由はまだ明確ではないが、再結合時の液柱衝突速度と管路内の粘性損失が関係していると思われ、その成立条件等について今後さらに詳細な検討が必要である。

5.4 下流端絞り

戻り管路の下流端に絞りを設け(Fig. 5(a))、定常圧力を上げれば液柱分離が発生しなくなる。また、管路端でインピーダンス整合することにより管路端での反

 Fig. 15 Effect of the check valve position (Flow rate= $0.075 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $T_0=1$ ms, $T_1=0.4$ s)

射をなくすることができることはすでに知られている。整合オリフィス径は次式で近似できる⁽¹³⁾。

$$D_0 = \sqrt{\frac{2D}{\pi C_d}} \sqrt{\frac{\pi Q_0}{a}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Fig. 13は下流端オリフィス径とサージ圧力の関係を示したものである。図中、上流管路とインピーダンス整合するオリフィス径を矢印で示した。この結果から、できるだけ定常圧力損失を低くして液柱分離を防止するためには、インピーダンス整合する直径以下のオリフィスを使用すればよいと言える。また、この時のオリフィスによる定常圧力損失 ΔP は次式で求められ、その値は管路径の2乗に反比例する。

$$\Delta P = (2\rho a Q_0) / (\pi D^2) \quad \dots\dots\dots (17)$$

したがって、管路径を大きくすることにより定常圧力損失をさらに低く押さえることができる。

5.7 チェック弁

Fig. 14はクラッキング圧力0.35MPaのチェック弁(ボペット質量:0.062kg,ばね定数:13230N/m,受圧面積: $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)を戻り管路中間部に取付けた場合(Fig. 5(c))の計算例である。この図から、上流で弁を閉じただけではチェック弁上流で負圧が保持されサージ圧力は発生せず下流側でサージ圧力が発生するだけであるが、上流切換弁の開閉を繰り返した場合チェック弁上下流で共に大きなサージ圧力が発生することがわかる。

また、チェック弁の取付位置(切換弁からの距離)とサージ圧力の関係をFig. 15に示す。全体の傾向としては、取付位置が下流端に近い程サージ圧力は小さく

Fig. 16 Proposed circuit for reducing surge pressure

Fig. 17 Proposed circuit calculated results

Fig. 18 Proposed circuit experimental results

なるが中間点で急激にサージ圧力が小さくなる位置がある。この原因は明確ではないが、管路内の波動伝播速度と弁の応答速度に起因した現象と考えられる。

5.8 サージ圧力低減回路

下流端絞りのインピーダンス整合によりサージ圧力が低減できることは示したが、絞りによる圧損は避けられない。一方、液柱分離によるサージ圧力は、再結

合時の衝突速度に関係しておりこれを小さくすることにより低減できることは明かである。そこで、クラッキング圧力の小さなチェック弁(ボペット質量: 0.062 kg, バネ定数: 98 N/m, 受圧面積: $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)と管路を設けて衝突速度を小さくすることを狙った戻り回路について検討した。回路をFig. 16に示す。Fig. 17はFig. 16に示した回路諸元に対する計算結果で、本回路の効果が予想される。そして、回路No. 2に関して実験的に確認した結果もFig. 18に示すように大きな低減効果を示した。ここで、実験結果の低減効果が計算結果よりも大きいのは、現実には問題とならないようなインパルス状の圧力⁽⁴⁾が計算に現れたのに対して、実験では計測機器の周波数応答特性の限界等により観測できなかったためと考えられる。

6. 結 言

以上、従来から用いられている計算モデルを利用して汎用的な管路系シミュレーションプログラムを開発し、これにより低圧管路での液柱分離に伴うサージ圧力についていくつかの検討を行った。その結果、本プログラムの有効性を確認すると同時に、低圧管路における液柱分離再結合に起因したサージ圧力に関して以下の結論を得ることができた。

- (1) 作動流体の気泡混入率はサージ圧力に非常に大きな影響を与え、同じ回路系でも気泡混入率によりサージ圧力は3倍近く異なることがある。
- (2) 低圧管路上流の弁を連続的に切換え、開閉を繰り返すと単に弁を閉止した場合よりも大きなサージ圧力が発生する場合がある。
- (3) 今回対象とした管路では、比較的流速が速い場合サージ圧力は(管路長)/(管路内径)²で整理でき、この値が大きい程サージ圧力は小さくなり、同じであればサージ圧力もほぼ同一となる。
- (4) インピーダンス整合したオリフィスを下流端に入れることにより液柱分離は防止できる。この時、定常圧力損失を低減するためには管路径を大きくすると良い。
- (5) チェック弁は下流端の近くに入れた方がサージ圧力が小さくなる。

- (6) 戻り管路におけるサージ圧低減回路の効果を計算、実験の両面から確認した。

なお、本研究を進める上で貴重な御助言をいただいた上智大学高橋浩爾教授、カヤバ工業㈱井上淳氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 例えば, Wylie. E.B, HYDRAULIC TRAN-
SIENTS, McGraw-Hill, (1967)
- (2) 棚橋隆彦, 他, 機論, 35-279, (44-11), 2217
- (3) 山本勝弘, 機論B, 49-446, (58-10), 2248
- (4) 北川能, 機論, 44-383, (53-7), 2352
- (5) 池尾茂, ターボ機械, vol. 3-no. 4, (1975), 760
- (6) 池尾茂, 他, 機論, 41-342, (50-2), 588
- (7) 山口健二, 他, 機論B, 51-471, (60-2), 536
- (8) 新井澄夫, 機論B, 51-471 (60-11), 3665
- (9) 香川利治, 機論B, 49-447, (58-111), 2638
- (10) 例えば, 一柳健, 機論, 38-310, (47-6), 1462
- (11) 例えば, 高橋浩爾, 油圧技術, vol. 12-no. 4,
(1973-4), 91
- (12) M.E. Fowler, 他, IBM Journal, (1967-9), 537
- (13) 例えば, 高橋浩爾, 油圧技術, vol. 12-no. 9,
(1973-9), 48
- (14) 山口健二, 他, 機論B, 51-462, (60-2), 536
- (15) 山脇章, 他, 石川島播磨技報, vol. 22-no. 3,
(1982), 158

コーヒーブレイク

「お ふ く ろ の 味」考 (2)*

町 山 忠 弘**

「女子学生亡国論」を暉峻康隆先生(早大教授・文学部)が書かれたのはもう昔のことである。大学生に占める女性の割合が年々増大し、学部によっては過半数に及ぶ昨今である。

大学に入学することはかなりの難事であるから、中・高校時代からしかるべく準備をしなければならない。大学に入って「やれやれ」とほっとするようである。大学に入ると、僅かな拘束で大巾に自由度をえる。豊饒な社会は無数の誘惑刺激をもって彼女等を八裂きにしてしまう。といった具合で、家に在って母親から伝習さるべき生活技術に類することは殆んど伝習の機会がない。その一つが料理である。食いしん坊の私には誠に気になる。

料理学校、クッキング・スクールがたくさんできた。盛況のようである。名料理家の名を冠したものが少なくない。母親から長期にわたって伝習していた料理技術を、システムティックに短期に教育するのであるからはな

はだ合理的である。伝習の機会をえなかった人には大変便利であろう。

しかし「おふくろの味」は継承されはしない。学校ごとにホモジェニアスな味になりかねない。迷惑なのは、名料理家(学校名に冠になっている)の権威の押し売りである。「○○先生の教えた通りの味付だから美味しいはずだ」という類である。

たかが食うことといわれるかもしれないが、食いしん坊の私にとっては由々しい問題なのである。地方の都市化、都市の田舎化というホモゲナイズが進行し、「おふくろの味」も「地方の珍味」も失なわれていくのは淋しい。

社会状況に適合した形で合理的な教育をするというのは結構なことに違いないが、何か欠落・消滅していくものがあるように思われる。食文化はそれ自体単独のものではないので、Technologyの次元でも見直しが要るのかも。

*平成3年8月22日 原稿受付

**日本工業大学機械工学科

(所在地 〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)