パーソナルコンピュータによる油圧制御系のデジタルシミュレータ*
(第3報, 管路の任意位置に対するブロック線図表示とそのシミュレーション法)

武藤 高 義*¹, 粥川 浩 宣*²
豊岡 司*², 川本 忠*³

Digital Simulator for Hydraulic Control Systems by a Personal Computer
(3rd Report, Block Diagram Representation for Arbitrary Pipe
Position and Simulation by Resulting Diagram)

Takayoshi MUTO, Hirotaka KAYUKAWA,
Tsukasa TOYOOKA, and Tadashi KAWAMOTO

The objective of this study is to develop a personal CAD system which is aimed at calculating the time response characteristics of hydraulic control systems. In the previous paper, a simulation method for fluid line systems was investigated, based upon their block diagram representations for four terminal networks. An important limitation in the method, however, was that the response could be calculated only at the up- or down-stream end of fluid lines. In the present paper, therefore, the block diagram representations of a fluid line are obtained as expanded ones for arbitrary pipe positions, in order to develop the calculation method at these positions. To see the applicability of the diagram to the simulation, time responses at arbitrary pipe positions are calculated under various fluid line conditions. Their results are compared with the measured responses to show the validity of the method.

Key Words: Hydraulic Control Systems, Digital Simulator, Personal Computer, Block Diagram, Time Responses, Fluid Line Systems, Arbitrary Pipe Position

1. ま え が き

本研究⁽¹⁾⁽²⁾の目的は、油圧制御系に対する時間応答シミュレータをパーソナルコンピュータ上で開発・実現することにあるが、本報では前報⁽²⁾に引き続き管路系のシミュレーション法について検討する。前報では、(1)まず Goodson ら⁽³⁾の手法に従って管路系をブロック線図表示し、(2)次に各ブロック要素に対するインディシャル応答とランプ応答を求め、(3)これらの重畳積分を行うことによって各種管路系の時間応答が計算しうることを示した。4端子回路に基づく上記のブロック線図は、表現が簡潔であり、また他の要素との接続が容易であるなどの特長をもつ。一方、従来のこれらブロック線図^{(4)~(6)}は、いずれも管路の両端にのみ注目し、その中間部分への関心を欠いて表現がなされてきた。油圧系の解析・設計に際して、管路途中での圧力または流量の応答は、両端でのそれと同程度に重要である。本報ではこの点に注目し、Goodson らのブロック線図を基本に据えつつ、これを管路の任意位置

で応答が求められるものへと拡張をまず試みる。結果として得られるそのブロック線図は、Goodson らによる線図を一般化した表現形式で与えられ、また先の特長をそのまま保存する。次に、このブロック線図によるシミュレーション法の妥当性を検証するため、管終端の境界条件を開放、閉鎖またはばね・質量負荷を取付けたときの各場合に対して、圧力入力(管始端の圧力を入力変数とするとき)および流量入力とするときの各応答を計算し、その結果を実験値と比較検討する。

2. ブロック線図表示

図1に示されるような管路の始端、位置 x 、および終端における各圧力と流量を、それぞれ P_1, Q_1, P_x, Q_x 、および P_2, Q_2 、とおくとき(ただし各変数はラプラス領域でのそれを意味する)、次式の関係が成り立つ⁽⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} P_x \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & -Z_c \sinh \gamma x \\ -Y_c \sinh \gamma x & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma z & -Z_c \sinh \gamma z \\ -Y_c \sinh \gamma z & \cosh \gamma z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ Q_x \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

* 昭和62年3月17日 東海支部第36期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年8月14日。

*¹ 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

*² 学生員、岐阜大学大学院。

*³ 学生員、名古屋大学大学院 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

ただし,

$$z=l-x, \quad \gamma=\gamma_0 s/c, \quad Z_c=Y_c^{-1}=\gamma_0 \rho c/a$$

$$\gamma_0=\sqrt{I_0(\chi_0)/I_2(\chi_0)}\approx 1+1/\chi_0+1/\chi_0^2$$

$$\chi_0=r_0\sqrt{s/\nu}$$

であり, ここに s : ラプラス演算子, c : 波動の伝ば速度, ρ : 油の密度, a : 管断面積, I_0, I_2 : 変形ベッセル関数, r_0 : 管半径, ν : 動粘度とする.

式(1), (2)の各関係は, 前報⁽²⁾と同様な形式(a~d)に従ってブロック線図表示がなされ, 例えば形式aの場合について, それぞれ図2, 3のように得られる(以下, 両者のa形式をそれぞれa1, a2形式などのように記して区別する).

さて, 図2, 3などを合成し, 応答 P_x, Q_x を含んだときの4形式のブロック線図(改めてa~d形式と記す)は次のようにして得られる. まず, 形式aのそれは, 形式b1とa2の線図を縦続(cascade)接続することにより図4のように得られる. 同様に形式b, c, dのそれが, それぞれ形式b1とb2, c1とc2, c1とd2の各接続により得られ, 図4との共通部分を除いて示せば, それらは図5のようになる(図中の一点鎖線が共通部分を表す).

次に図4, 5の表現を簡単化(等価変換)する. いま図4の線図に対して, 信号 e, f, g, h を図中の各箇所(図4)で定義する. このとき各信号に関して次のような関係が成り立つ.

$$e=g, \quad f=h \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} P_x &= Z_c(e-f)/2 \\ Q_x &= (e+f)/2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上2式の関係を考慮すれば, 結局, 図4は図6(a)のように等価変換がなされる(ただし, $\Gamma=\gamma l, X=x/l$ を用いて記した). 同様に形式b, c, dのブロック線図が同図の(b), (c), (d)のように得られる. 図6によれば, 管路の任意位置における応答 P_x, Q_x を含むブロック線図が, 簡潔, 合理的に表現されている. またそれは, Goodsonらのブロック線図を拡張した一般的表現であることが理解される.

さて図6に基づくシミュレーション計算に際しては, 各ブロック要素に対するインディシャル応答 $\phi(t)$

とランプ応答 $\psi(t)$ とを必要とするが, 本報の段階では, 新たに $e^{-\gamma x}, e^{-\gamma(1-x)}$ の2個のブロック要素に対してのみそれらが求められればよい. 前報の結果($e^{-\gamma}$ に対する両応答)を参照すれば, 例えば $e^{-\gamma x}$ に対する各応答 $\phi_{rx}(t)$ と $\psi_{rx}(t)$ が, 次のように与えられる.

$$\begin{aligned} \phi_{rx} &= e^{-\gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{t_0 X}{2r_0} \sqrt{\frac{\nu}{t-t_0 X}} \right) \\ &\times u(t-t_0 X) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_{rx} &= e^{-\gamma x} \left[-\frac{t_0 X}{r_0} \sqrt{\frac{\nu}{\pi(t-t_0 X)}} \right. \\ &\times \exp \left\{ -\frac{\nu(t_0 X)^2}{4r_0^2(t-t_0 X)} \right\} + \left\{ t-t_0 X \right. \\ &\left. + \frac{\nu(t_0 X)^2}{2r_0^2} \right\} \operatorname{erfc} \left(\frac{t_0 X}{2r_0} \sqrt{\frac{\nu}{t-t_0 X}} \right) \left. \right] \\ &\times u(t-t_0 X) \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

また, $e^{-\gamma(1-x)}$ に対する各応答は, それぞれ上2式中の X を $(1-X)$ に代えた表式で与えられる.

以上の結果を前報のシミュレーション法に適用すれば, 種々の負荷条件下における圧力と流量の応答を管路の任意位置に対して求めることができる.

図1 管路系

図2 式(1)のブロック線図表示(a1形式)

図3 式(2)のブロック線図表示(a2形式)

図4 a形式のブロック線図(b1とa2形式の縦続接続)

3. 実験値との比較検討

本章では、先に得られたブロック線図に基づくシミュレーション法の妥当性を検討するため、前報と同じく、次の3種の管路系を代表例に選び、それらに対する圧力応答などの計算値を実験値と比較検討する。

管路系-i: Q_1 を入力とし、管終端を開放 ($Z_L=0$) とするとき

管路系-ii: P_1 を入力とし、管終端を閉鎖 ($Y_L=0$) とするとき

管路系-iii: P_1 を入力とし、ばね・質量負荷を接続した管路系

表1に、各実験諸元を一括して示す (なお実験装置、方法については既報⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を参照)。

まず管路系-iを対象にして行われたステップ応答の実験値と計算値との比較結果を図7に示す。図中の実線が実験値、破線が計算値を表す (この扱いは以下の図においても同様とする)。図には入力 $q_1(t)$ に対する無次元圧力応答 $\bar{P}_x [=ap_x/(\rho c q_1)]$ が、時間 $T (=t/t_0)$ に対して示されている。この図によれば、管路の

表1 管路系-i, ii, iiiに対する実験の諸元

System	System parameter
Line-i	$D=0.025$, $(\rho c/a) q_1=0.502$ MPa (=5.12 kgf/cm ²) $l=10.6$ m, $v=0.692 \times 10^{-4}$ m ² /s, $c=1380$ m/s
Line-ii	$D=0.013$, $P_{10}=0.915$ MPa, $l=4.70$ m $v=0.800 \times 10^{-4}$ m ² /s, $c=1380$ m/s
Line-iii	$D=0.013$, $P_{10}=0.988$ MPa, $c=1380$ m/s $v=0.820 \times 10^{-4}$ m ² /s, $\omega_n=\sqrt{k/m}=267$ rad/s $c_1=45.7$ Ns/m (=4.66 kgf·s/m), $l=4.70$ m $r_0=0.46$ cm

(a) b形式 (b1+b2)

(b) c形式 (c1+c2)

(c) d形式 (c1+d2)

図5 b, c, d形式のブロック線図

位置 $X (=0.513)$ における応答の計算値は、対応の実験値とよい一致を示している (ただしコンピュータによる計測法⁽⁸⁾を取り入れたこの場合、主にA/D変換器の精度に起因して、図示のように、実測波形は量子化に伴う若干の不連続部を呈している)。

次に管路系-ii, iiiの場合についてであるが、系への入力をステップ波形で与えた先の場合に対し、これらの実験ではより複雑な波形を与えて行った。電磁比例制御弁とコンピュータを使って⁽⁸⁾作り出された q_1 の波形を図8に示す。両管路系に対するこの入力波形 q_1 は数値データ化されて計測 (記憶) がなされており、したがってシミュレーション計算に際しては、このデータを直接用いて対応の応答が算出される。このようにして得られた管路系-iiに対する応答の比較図を先

(a) a形式

(b) b形式

(c) c形式

(d) d形式

図6 4形式のブロック線図

図7 管路系-iに対するステップ応答 $\bar{P}_x$

図8 管路系-ii, iiiに対する入力波形 p_1 (a) 応答 $\bar{P}_x$ (a) $\bar{P}_x$ (b) 応答 $\bar{P}_2$ (b) 応答 $\bar{P}_2$ と入力 $\bar{P}_1$ (c) 負荷変位 y

図9 管路系-iiにおける圧力応答

図10 管路系-iiiにおける応答

図9(a), (b)に示す。図の(a), (b)は、それぞれ位置 $X (=0.545)$ と管末端での各圧力 $\bar{P}_x (=p_x/p_{10})$ 、ここに p_{10} は p_1 の定常値) と $\bar{P}_2 (=p_2/p_{10})$ を表す[なお図(b)中には、比較のため入力圧力 $\bar{P}_1$ も記した]。次に、管路系-iiiに対する同様な比較図を図10(a), (b), (c)に示す。各図はそれぞれ $\bar{P}_x$, $\bar{P}_2$ および負荷変位 y を表す。図9, 10によれば、入力 $\bar{P}_1$ がいわば任意的変動を伴うときに対しても、管路位置 X での応答を含む各計算値は実験値と良好に一致している。これより、本報で提起されたブロック線図、およびそれによるシミュレーション法の妥当性が知れる。

4. あとがき

油圧制御系に対する汎用のデジタルシミュレータ開発を目指す本研究中、本報では前報に引き続き特に管路系に注目し、そのシミュレーションに必要とされる基礎的事項について検討した。すなわち、管路系における圧力と流量の時間応答を管路の任意位置で求めるよう、4端子回路に基づく Goodson らのブロック線図を一般化して表示した。そしてばね・質量負荷を有する管路系など、二、三の代表的な管路系に適応して得られたその時間応答波形(ステップ応答および任意波形応答)は、実験結果と良好に一致し、本シミュレーション法の妥当性が検証された。なお、本報の内

容に関連する事項として、以下の点を付記する。

油圧管路のシミュレーション法をより一般的に確立するためには、本報で扱った適応例などのほか、直列管や分岐管での検討が望まれる。これらに対するシミュレーション法としては、図6に示されるブロック線図の縦続接続または並列接続によってなされるのであるが、本報の段階では、次の事情により、その計算結果を提示するに至らなかった。その事情とは、計算途中で、実測にはみられない短周期の激しい振動が、応答波形に重畳して現れる場合が多かったことによる(このような計算上の不安定化傾向については、Karam ら⁽⁴⁾と Sidell ら⁽⁵⁾も類似の経験を報告している)。ブロック線図に基づいて、各要素の自在な接続が計られることを欲する本シミュレーション法の場合、このような不安定化傾向に対する適切な対処を求められるわけであるが、現段階では、問題の提起のみにとどめる。

終わりに、本研究に対して懇切なご指導をいただいた名古屋大学の伊藤忠哉教授ならびに有益なご討論をいただいた同学の末松良一助教授に厚く感謝する。

文 献

- (1) 武藤・粥川, 機論, 52-481, C (昭61), 2421.
- (2) 武藤・ほか3名, 機論, 52-482, C (昭61), 2683.

- (3) Goodson, R. E. and Leonard, R. G., *Trans. ASME*, Ser. D, 94-2 (1972), 474.
 - (4) Karam, J. T. JR. and Leonard, R. G., *Trans. ASME*, Ser. I, 95-4 (1973), 498.
 - (5) Sidell, R. S. and Wormley, D. N., *Trans. ASME*, Ser. G, 99-1 (1977), 34.
 - (6) Johnson, B. L. and Wandling, D. E., *Trans. ASME*, Ser. D, 89-2 (1967), 440.
 - (7) 武藤・高橋, 機論, 51-462, B (昭 60), 528.
 - (8) 武藤・粥川, 機論, 52-482, B (昭 61), 3273.
-