

油圧管路系の動特性シミュレーションにおける 高速演算化の一手法について*

(第2報, 管路の任意位置における圧力と流量の計算)

福森 淳治^{*1}, 武藤 高義^{*2}, 山田 宏尚^{*2}

Fast and Convenient Method for Simulation of Fluid Transmission Lines (2nd Report, Pressure and Flow Rate at Arbitrary Position of Pipeline)

Junji FUKUMORI, Takayoshi MUTO and Hironao YAMADA

This study deals with a simulation method for a transient response of fluid transmission lines. In the previous report of this study, we proposed a faster and more convenient method for simulating the transient response of fluid rigid lines. In the same report, furthermore, we proposed a method for approximating in high accuracy an exact mathematical model of fluid transmission lines, which is formulated by a distributed parameter system, by a finite order rational polynomial. In this report, in succession, we deal with a similar method as before for simulating a transient response at arbitrary position of transmission lines, including not only rigid-tube but also viscoelastic-tube. It could be confirmed that simulated results of pressure and flow rate responses at arbitrary pipe position were obtained in considerably high accuracy by attaining a faster simulation.

Key Words: Fluid Power Systems, Pipeline Component, Computer Aided Design, Transmission Lines, Simulation, Mathematical Model, Transfer Matrix

1. 緒 言

電送線では、電気信号または電気パワーをできるだけ忠実かつ高速に、また最小のエネルギー損失によって伝達することが望まれる。この電送線(電気系)に対する流体系のアナロジーによれば、流体信号または流体パワーに関する同様な役割を担うのが油圧管路である。電送線・油圧管路ともに、その動特性を記述する数学モデルが分布定数系モデルによって表される点では共通している。しかしながら、次の事情により、油圧管路に対する取扱いは電送線よりもより複雑となる。すなわち、電送線における抵抗が周波数によらずほぼ一定と見なしうのに対して、油圧管路では、流動抵抗は周波数依存の性質をもつ(高周波になるほど抵抗は増大する。なお、この性質を考慮に入れた数学モデルは、一般に非定常粘性モデルと呼ばれている)。したがって、油圧管路を含むシステムを高速に駆動しようとすればするほど、その影響は顕在化する。

近年、油圧システムの高速化に関する要求の高まりに連れて、油圧管路系のシミュレーションをより高

速・高精度かつ簡便に実施することが強く求められている。このような状況下、前報⁽¹⁾では、油圧管路系の動特性シミュレーションを、パーソナルコンピュータレベルの計算機によって比較的高速・高精度に実施しうる方法の提案を行った。その続報として本報では、管路の任意位置における状態量(圧力と流量)を計算するためのシミュレーション法について検討する。前報では、管路の両端(始端および終端)における状態量のみを対象としたが、より一般的には、管路の任意位置における状態量が必要とされる。前報と同様な簡便さと精度によって管路任意位置における状態量の時間応答が計算できれば、管路位置に伴う圧力・流量脈動の挙動の変化状況をも詳細に知ることができる。

さらに前報では剛体管路を対象としたが、本報では、中野ら⁽²⁾⁽³⁾によって提案された油圧用高圧ゴムホースの動特性を精度よく表現できる粘弾性管壁モデルに基づき、剛体壁と粘弾性壁の両者に対応するより一般的な管路系(単一管路系)を扱う。中野らのモデルによれば、粘弾性壁パラメータのある極限值が剛体壁の場合に相当する。著者らは先に、この粘弾性壁モデルを採用したときの管路系の伝達マトリックス(式中に、双曲線関数や Bessel 関数を含む)を有理多項式によって精度よく近似し、これによる管路内過渡現象のシミュ

* 原稿受付 1997年9月10日。

^{*1} 正員、岐阜大学大学院(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

^{*2} 正員、岐阜大学工学部。

レーション結果が実験結果と良好に一致することを検証した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

以上のような背景・前提下に、本報では、粘弾性管壁モデル⁽²⁾⁽³⁾を採用したときの伝達マトリックスを基礎方程式として、まず、管路の任意位置での状態量を算出する方法について考察する。次に、(管路系を4端子回路表示したときの)管端条件のすべての組合せに対してシミュレーションを試み、得られた過渡現象の計算精度、演算の所要時間などについて検討し、本提案による方法の妥当性を検証する。

2. おもな記号

- a : 管路断面積 m^2
- c : 波動の伝ば速度 m/s
- C_0 : 制御弁ポート部の流量係数
- D : 無次元の減衰係数
- J_0, J_1 : 零次および1次の第1種ベッセル関数
- k_v : 制御弁のゲイン m/mA
- K : 油の体積弾性係数 Pa
- l : 管路長 m
- p_s : 供給圧力 Pa
- r_0 : 管路内半径 m
- s : ラプラス演算子
- S : 無次元のラプラス演算子
- t : 時間 s
- w : 制御弁開口部の周方向長さ m
- Z_c : 管路の特性インピーダンス
- Γ : 管路の伝ばオペレータ
- ζ : 制御弁の粘性減衰率
- ν : 作動油の動粘度 m^2/s
- ρ : 油の密度 kg/m^3
- ω_n : 制御弁の固有角振動数 rad/s

なお、 P, Q などの大文字は無次元化された変数、 \sim の付された変数はラプラス領域における変数を表す。

3. 基礎方程式

図1に示すような管長 l の油圧管路を考察の対象とする。管始端と終端の各圧力および流量をそれぞれ

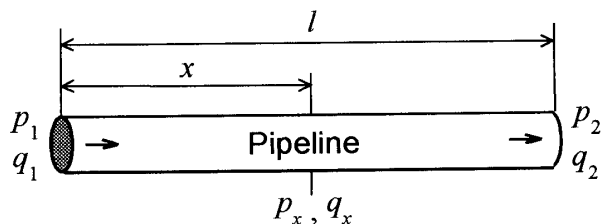


Fig. 1 Fluid line

p_1, q_1 および p_2, q_2 とし、管始端からの位置 x における圧力および流量をそれぞれ p_x, q_x とする。

剛体壁と粘弾性壁の両者に対応する一般的な管路系に対して、ラプラス領域における管始端および終端の無次元圧力と無次元流量の関係は式(1)のような伝達マトリックスで表される⁽²⁾⁽⁴⁾。

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \Gamma & Z_c \sinh \Gamma \\ Y_c \sinh \Gamma & \cosh \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P}_2 \\ \bar{Q}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} Z_c &= Y_c^{-1} = Z_0 \sqrt{F(S)G(S)}, Z_0 = \frac{\rho c}{a} \\ \Gamma &= DS \sqrt{\frac{F(S)}{G(S)}}, S = st_0, t_0 = \frac{r_0^2}{\nu} \\ F(S) &= \left[1 - \frac{2J_1(j\sqrt{S})}{j\sqrt{S}J_0(j\sqrt{S})} \right]^{-1} \\ G(S) &= \frac{T_1 S + 1}{T_2 S + 1}, D = \frac{\nu l}{c r_0^2} \\ T_1 &= \frac{\tau_1}{t_0}, T_2 = \frac{\tau_2}{t_0}, c = \sqrt{\frac{r_0 k_w}{2\rho}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 k_w および τ_1, τ_2 は管材のパラメータであり、図2に示すような粘弾性管壁に対するモデルを採用したとき、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{k_w} &= \frac{1}{k_{w1}} + \frac{1}{k_{w2}} + \frac{1}{k_{wh}}, k_{wh} = \frac{2K}{r_0} \\ \tau_1 &= \frac{d_w}{k_{w2}}, \tau_2 = \frac{d_w}{k_{w2} + \frac{k_{w1}k_{wh}}{k_{w1} + k_{wh}}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

図2に示されるモデルは、ばね的要素 k_{w1}, k_{w2} とダンパ的要素 d_w から成る三要素モデル⁽²⁾⁽³⁾である。図2中の y_w は管壁の半径方向の変位、 p_w は管路内の圧力である。このモデルでは、油のわずかな圧縮性を管の膨張に等価的に置き換えたばね的要素 k_{wh} が付加されている。このとき、管壁の仮想的変位 y_h と管路内圧力 p_w のラプラス領域における関係は次式で表される⁽²⁾⁽³⁾。

$$\frac{\bar{p}_w}{\bar{y}_h} = k_w \cdot \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} \quad \dots\dots (4)$$

なお、剛体管路を対象とする場合、式(2)中の $G(s), k_w$ は次式となる。

$$G(s) = 1, k_w = \frac{2K}{r_0} \quad \dots\dots (5)$$

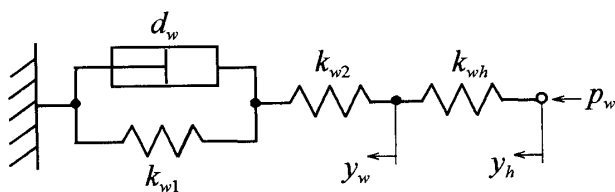


Fig. 2 Viscoelastic model for radial motion of fluid line

前報においては、式(1)を基礎方程式として、各伝達要素を有理多項式によって近似し、これにより管端変数 $(P_1, Q_1), (P_2, Q_2)$ を求める方法について検討した(ただし、剛体管路を対象)。次章においては、これら管端変数を既知量と見なして、管路の任意位置状態量 (P_X, Q_X) を求める方法について検討する。

4. 任意位置状態量の計算法

本章では、管端変数 $(P_1, Q_1), (P_2, Q_2)$ を前報の方法によって求めつつ(実際の計算では、それらのうち二つを既知量と見なす)、管路の位置 X における状態量 (P_X, Q_X) を算出する方法について検討する。状態量 (\hat{P}_X, \hat{Q}_X) と (\hat{P}_1, \hat{Q}_1) との関係、または (\hat{P}_2, \hat{Q}_2) との関係は、それぞれ式(6)、(7)のような伝達マトリックスで表される⁽⁶⁾。

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_1 \\ \hat{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma X) & Z_c \sinh(\Gamma X) \\ Y_c \sinh(\Gamma X) & \cosh(\Gamma X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_X \\ \hat{Q}_X \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_X \\ \hat{Q}_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma Y) & Z_c \sinh(\Gamma Y) \\ Y_c \sinh(\Gamma Y) & \cosh(\Gamma Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_2 \\ \hat{Q}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、無次元の管路位置 X, Y を次のようにおいた。

$$X = \frac{x}{l}, \quad Y = 1 - X \quad \dots\dots\dots (8)$$

さて、 \hat{P}_X, \hat{Q}_X を出力変数とみなし、一方、4個の管端変数 $(\hat{P}_1, \hat{Q}_1, \hat{P}_2, \hat{Q}_2)$ から2個を入力変数として選ぶときの組合せは、図3に示すように4とおり(以下、型式A～Dと呼ぶ)存在する。

式(6)、(7)を用いて、図3に示される各要素の関係をブロック線図表示すれば、図4のような共通の図によって表される(ただし、入力変数を I_1, I_2 、出力変数を O_1, O_2 とした)。ここに、図4中の伝達要素 $G_1 \sim G_4$ は、型式A～Dに応じて異なり、その選択は表1に従って行われる(なお、図4に対する入出力変数としては、図3の各場合を対応させるものとする)。

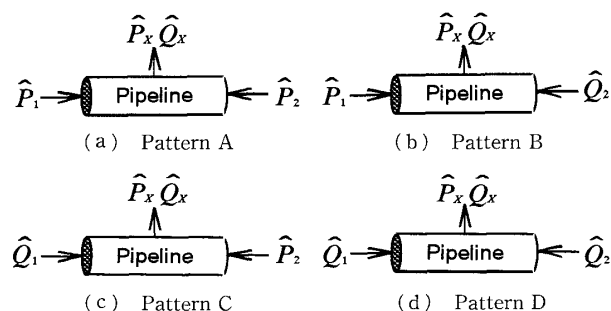


Fig. 3 Four patterns for calculating \hat{P}_X and \hat{Q}_X

表1によれば、10種類の伝達関数が存在する。これらの伝達関数において、 X または Y を $X=1, Y=1$ とおけば前報の7種類の各伝達関数に一致する[ただし、剛体管路の場合に相当。粘弾性管路に対しては文献(4)の場合に相当]。いい換えれば、 X, Y が新たに付加された点のみが前報⁽¹⁾⁽⁴⁾などの伝達関数との相違点である。したがって、表中の伝達関数に対する有理多項式近似式は、基本的に前報と同一の方法によって求めることができる。これによって得られた一例を次に示す。

$$\frac{\cosh(\Gamma X)}{Z_c \sinh(\Gamma X)} = \frac{1}{8DX} \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{k_i}{u_i} + \sum_{i=1}^n \frac{b_{1i}}{\omega_{nsi}^2}} \times \left(\sum_{i=1}^m \frac{k_i}{S + u_i} + \sum_{i=1}^n \frac{a_{1i}S + b_{1i}}{S^2 + 2\zeta_{si}\omega_{nsi}S + \omega_{nsi}^2} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

上式と前報[または文献(4)]での相当する式とを比較すると、前報での減衰係数 D が上式では DX に変化している点が基本的な相違点である(他の9種類の場合についても全く同様となる)。ただし、式(9)中における $a_{1i}, b_{1i}, k_i, u_i, \zeta_{si}, \omega_{nsi}$ などの係数値については新たに求める必要がある。以上によれば、任意

Table 1 Transfer matrix elements for each particular input and output

	(a)	(b)	(c)	(d)
I_1	\hat{P}_1	\hat{P}_1	\hat{Q}_1	\hat{Q}_1
O_1	\hat{P}_X	\hat{Q}_X	\hat{P}_X	\hat{Q}_X
O_2	\hat{Q}_X	\hat{P}_X	\hat{Q}_X	\hat{P}_X
I_2	\hat{P}_2	\hat{Q}_2	\hat{P}_2	\hat{Q}_2
G_1	$\frac{1}{Z_c \sinh(\Gamma X)}$	$\frac{1}{\cosh(\Gamma X)}$	$\frac{1}{\cosh(\Gamma X)}$	$\frac{Z_c}{\sinh(\Gamma X)}$
G_2	$-\frac{\cosh(\Gamma X)}{Z_c \sinh(\Gamma X)}$	$-\frac{Z_c \sinh(\Gamma X)}{\cosh(\Gamma X)}$	$-\frac{\sinh(\Gamma X)}{Z_c \cosh(\Gamma X)}$	$-\frac{Z_c \cosh(\Gamma X)}{\sinh(\Gamma X)}$
G_3	$\frac{Z_c \sinh(\Gamma Y)}{\cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{\sinh(\Gamma Y)}{Z_c \cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{Z_c \sinh(\Gamma Y)}{\cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{\sinh(\Gamma Y)}{Z_c \cosh(\Gamma Y)}$
G_4	$\frac{1}{\cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{1}{\cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{1}{\cosh(\Gamma Y)}$	$\frac{1}{\cosh(\Gamma Y)}$

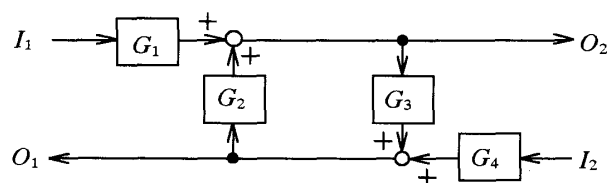


Fig. 4 Total block diagram representation

位置状態量を求めるための計算法は、基本的に前報と同様であり、また計算の精度についても前報と同様と見なうことが理解される。

なお、式(9)によれば、有理多項式近似式は一次遅れ要素と二次遅れ要素の級数和により表現されているが、これら級数項 m, n は(前報と同様の仕方で)、解の精度を支配する。

5. シミュレーションの検討

本章では、剛体管路系および粘弾性管路系を対象として、管路位置 X での状態量 P_X, Q_X のシミュレーションを実施し、それらの演算時間、計算精度などについて検討しつつ、4章で述べた計算法(以下、本計算法と呼ぶ)の妥当性を検証する。以下、剛体管路系と粘弾性管路系の各場合に分けて述べる。

5.1 剛体管路の場合 本節では、剛体管路系に対する本計算法結果との比較基準として、Brown 近似⁽⁶⁾を取入れた畳込み演算による計算法⁽⁶⁾(以下、Brown モデル法と呼ぶ)を採用する。なお、Brown モデル法によれば、計算アルゴリズムがやや煩雑となるため、比較的長い演算時間を要するものの、高精度の過渡応答解が得られることを著者らはすでに確認している⁽⁶⁾。

シミュレーションで用いる管路条件としては、図3に示す4種の型式のすべてを選び、表2に示すような管始端および終端条件のもとで計算する(表2中、例えば型式Aにおける管路条件は、終端に容量負荷(容積 V)が接続され、始端から圧力 P_1 のステップ入力を与えられることを、また型式Dの場合は、終端が閉鎖

され、上流側に制御弁が接続されていることを表す)。なお、計算に用いたおもなパラメータの値を表3に示す。以下、本節中に示す図中、いずれも実線は本計算法、破線が Brown モデル法による各計算結果を表す。また、各図中の縦軸変数の圧力 P_X と流量 Q_X は、それぞれ基準圧力 p_0 と基準流量 q_0 によって無次元化され、横軸変数は無次元時間 $T(=t/t_0, t_0=l/c=3.62 \times 10^{-3} \text{ s})$ を表すものとする。

まず、型式Aの管路条件に対して、管路位置を $X=0.7$ とするときの圧力・流量、ならびに管終端での圧力を計算した結果が図5(a)~(c)に示されている。これら Brown モデル法と本計算法による計算結果の比較によれば、両者に関するほぼ良好な一致が得られている。

次に、型式Bの管路条件に対して、先と同様な結果(管路位置は、 $X=0.7$)を図6(a), (b)に示す。また、型式Cに対する同様な結果(管路位置は、 $X=0.5$)を図7(a), (b)に示す。

さらに、型式Dの管路系に対しては、管始端に接続した制御弁への駆動電流をステップ波形で与え、これによって生ずる(弁の)スプール変位 z , ならびに管路位置 $X=0.5$ での圧力、管終端での圧力を計算した。その結果を図8(a), (b), (c)に示す。図8中、スプール変位 Z は、基準変位量 $z_0(=0.31 \times 10^{-3} \text{ m})$ で無次元化してある。

以上の比較結果によれば、4種の基本型式に関する

Table 2 Pipeline conditions for simulation

Pattern	Upstream end	Downstream end
A	P_1 step input ($P_1=1$)	Volume load ($V=1.55 \times 10^{-4} \text{ m}^3$)
B	P_1 step input ($P_1=1$)	Closed-end ($Q_2=0$)
C	Q_1 step input ($Q_1=1$)	Open-end ($P_2=0$)
D	Control valve	Closed-end ($Q_2=0$)

Table 3 Main parameters

Pipeline	$l=5.0 \text{ m}, r_0=4.6 \times 10^{-3} \text{ m}$
Control valve	$\omega_n=880 \text{ rad/sec}, \zeta=0.72, C_o=0.419$ $k_v=1.55 \times 10^{-6} \text{ m/mA}, w=0.011 \text{ m}$
Other Parameters	$\nu=0.83 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \rho=862 \text{ kg/m}^3$ $K=1.56 \text{ GPa}, c=1380 \text{ m/s}$ $p_0=1.0 \text{ MPa}, q_0=5.59 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

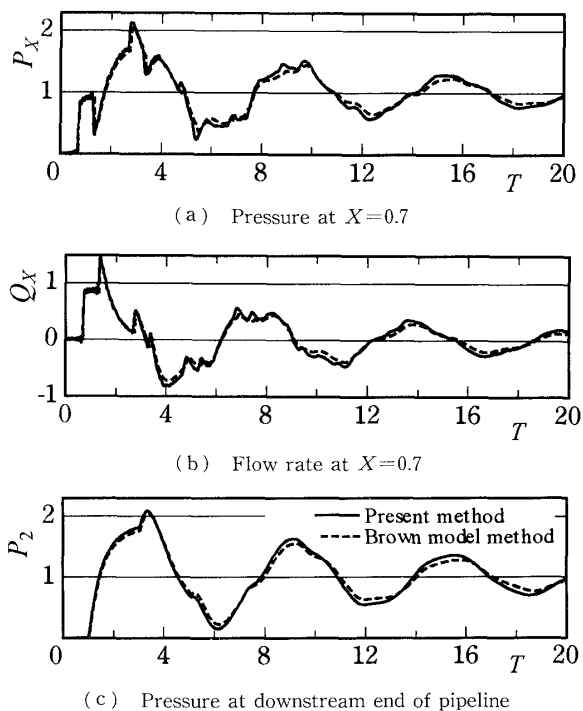


Fig.5 Simulation of transient response for pattern A

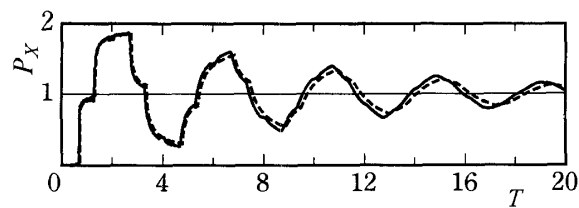
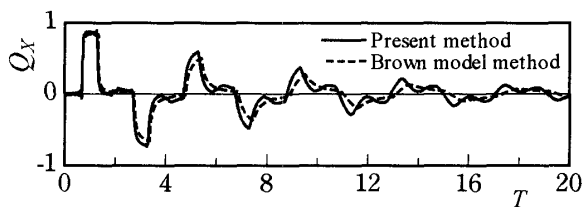
(a) Pressure at $X=0.7$ (b) Flow rate at $X=0.7$

Fig. 6 Simulation of transient response for pattern B

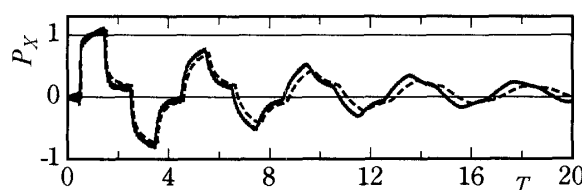
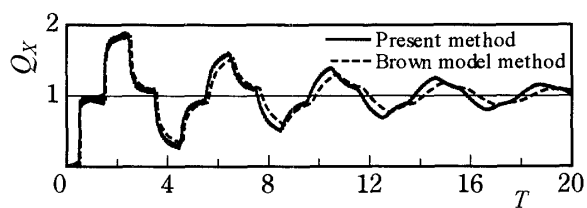
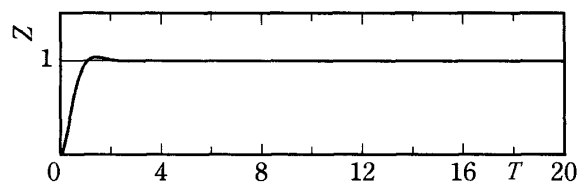
(a) Pressure at $X=0.5$ (b) Flow rate at $X=0.5$

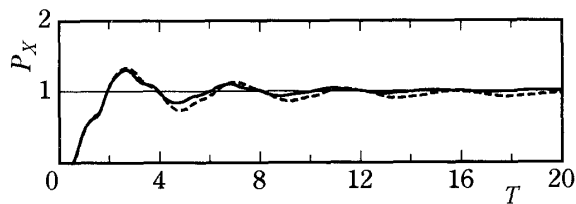
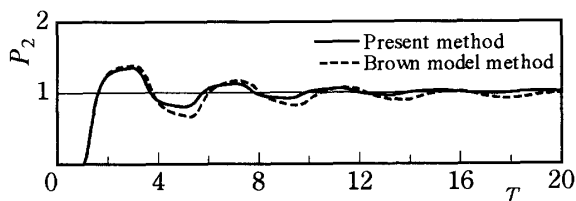
Fig. 7 Simulation of transient response for pattern C

すべての管路条件に対して、本計算法と Brown モデル法の両結果はよい一致を示しており、本計算法の妥当性が確認される。

次に本計算法による演算時間についての検討結果を以下に要約する。例えば図 6 (型式 B) の場合について、計算機として NEC 社製パーソナルコンピュータ PC-9821 Xv 13 (Pentium 133) を用い、同一の刻み時間 ($\Delta T=0.01$) に対する演算時間を計測した結果、Brown モデル法では 40 秒、本計算法では 8 秒となり、1/5 の高速化が得られた。ただし、この比率は、計算の終了時間 (図示の場合、いずれも $T=20$)、刻み時間 ΔT 、および有理多項式近似における級数項 m, n によって変化し、特に、計算の終了時間を長くするほど、また ΔT を小さくするほど、(本計算法での演算時間は比例的に増大するのに対して)、Brown モデル法でのそれは指数関数的に増大した (その理由は、本計算法では常微分方程式に対する通常の数値積分法を用い



(a) Displacement of spool

(b) Pressure at $X=0.5$ 

(c) Pressure at downstream end of pipeline

Fig. 8 Simulation of transient response for pattern D

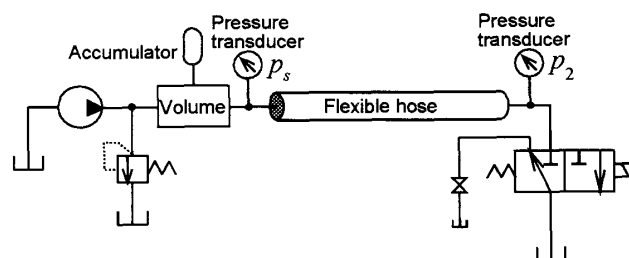


Fig. 9 Experimental apparatus

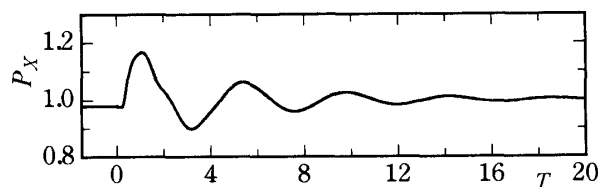
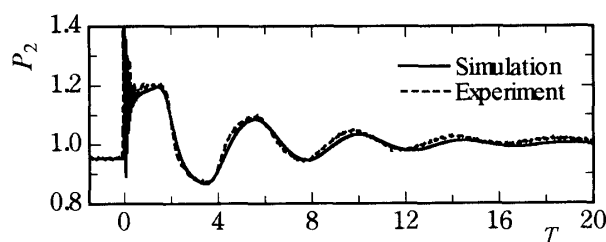
ているのに対し、Brown モデル法では畳込み演算法を用いていることによる)。以上は図 6 (型式 B) における検討結果の具体例であったが、他の図および型式の場合についてもほぼ同様な傾向を示し、本計算法による高速化の達成が確認された。

5・2 粘弾性管路の場合 粘弾性管路系に対しては、対応する実験結果との比較に基づき本計算法の妥当性について検討する。ただし、粘弾性管路の場合、管路途中での圧力測定が困難な事情に基づき、計算結果との比較は管路端での実測圧力に対してのみ実施せざるを得なかった (半導体式圧力変換器を用いる通常の測定法の場合、粘弾性壁の性質を損なうことなく、センサを取付けることが困難な事情による)。

実験装置の概略図を図 9 に示す。図示のように、粘弾性管路の上流には一定圧力 p_s の油圧源が接続されており、また下流端には高速電磁弁が接続されている。実験では、初期の状態では一定流量 q_0 を管路の上

Table 4 Parameters of experiment

Flexible Hose	$l = 2.24 \text{ m}$, $r_0 = 4.7 \times 10^{-3} \text{ m}$, $c = 309 \text{ m/s}$ $d_w = 1.93 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$, $k_w = 3.45 \times 10^{10} \text{ Pa/m}$ $\tau_1 = 0.4 \times 10^{-3} \text{ s}$, $\tau_2 = 0.114 \times 10^{-3} \text{ s}$
Other Parameters	$\rho = 862 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.83 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $p_s = 0.98 \text{ MPa}$, $q_0 = 48.0 \text{ cm}^3/\text{s}$

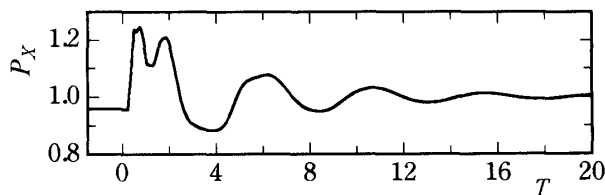
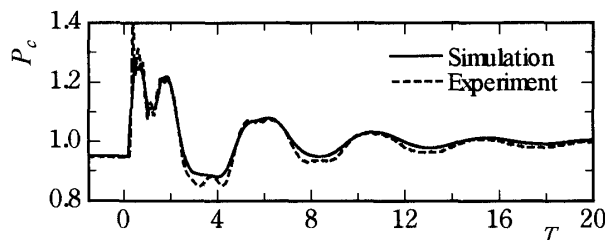
(a) Pressure at $X=0.5$ 

(b) Pressure at downstream end of flexible hose

Fig. 10 Transient response caused in flexible hose

流側から与えておき、次いで弁を急閉鎖し、これによって生ずる管路内圧力変動を測定する。実験に使用した粘弾性管路の諸元および実験条件を表4に示す。以下に示す図中、いずれも実線は本計算結果、破線が実験結果を示す。

まず図10に、弁を急閉鎖した直後に生ずる圧力応答波形を示す。図10(a)には管路位置 $X=0.5$ での圧力 P_x 、図10(b)には下流端での圧力 P_2 が示されている。なお、各図の縦軸変数の P_x , P_2 は供給圧力 p_s によって無次元化されており、横軸変数は無次元時間 $T (=t/t_0, t_0=l/c=7.25 \times 10^{-3} \text{ s})$ を表す。図10(b)において、計算および実験結果ともに、 $T=0$ の近傍で鋭い突起状の挙動(およびその後続く減衰振動)が見られる(縮尺の関係上、図ではやや見づらい表現となっている)。おもにシミュレーションによる検討結果によれば、その発生は、①粘弾性管路と電磁弁を接続するに必要な継手(長さ0.068 m、内径6.4 mm)、②圧力センサ取付用の鉄製ブロック(長さ0.04 m、内径9.5 mm)、③粘弾性管路の終端におけるかしめ部分(長さ0.045 m、内径6.0 mm)などの剛体管路部の影響が集積した結果と推察される[計算では、これらによって構成される管路部を1本の等価な剛体管路(容積換算より、長さ0.153 m、内径7.2 mmとした)に置

(a) Pressure at $X=0.5$ 

(b) Pressure at downstream end of flexible hose

Fig. 11 Transient response caused in series line

き換えた。粘弾性管路と電磁弁を管路および継手なしで接続することは実際上不可能であり、また圧力センサ用ブロックを設置することにより、粘弾性管路と短い剛体管路の接続部には微小ながらも段違い部を許容せざるを得なかった]。

次に、上記の実験で用いた粘弾性管路の下流側(電磁弁側)に剛体管路($l=2.6 \text{ m}$, $r_0=4.5 \text{ mm}$)を接続し、直列管とした場合についての先と同様な検討を行った。図11がその結果であり、図中の縦軸変数 P_c は両管路の接続部での圧力を表す。図11(b)の実験波形によれば、 $T=0$ の近傍で図10と同様の挙動が見られるが、その成因についても先と同様と推察される。

図10, 11の結果によれば、実験結果は対応の計算結果とほぼよい一致を示している。なお、粘弾性管路の途中における2例の計算結果については、対応の実験結果が得られないため、本研究の段階ではその検証を留保する。ただし、各図の図(a)と図(b)とを比較検討すれば、本計算結果がほぼ妥当であると推察される。

6. 結 言

本研究では、油圧管路系を対象として、管路の任意位置における状態量(圧力と流量)を高速・高精度でシミュレーションする方法について検討した。

剛体壁と粘弾性壁に対応する一般的な管路系に対して、非定常粘性モデルに基づく伝達マトリックスを基礎式とし、管路の任意位置における状態量の関係をブロック線図表示し、そこに現れる各伝達関数を有理多項式によって近似表現した。これら近似式は、基本的に前報でのそれと同形であり、したがって前報とほぼ

同様の手法によってシミュレーションを実施できる。

まず剛体管路における過渡現象のシミュレーション結果は, Brownモデル法による計算結果(厳密解)と良好に一致し, 本手法の妥当性が確認された。次に粘弾性管路に対しては, 任意位置での状態量を精度よく実測する手法が未確立である事情から, 現段階では, 直接に実験的検証を得るに至らなかった。ただし, 剛体管路に対する上記の検証を前提とすれば, 剛体壁および粘弾性壁の両管路に対する基礎式ならびに計算手法の類似性から, また管端における実験結果との比較検討により, 本シミュレーション法の有効性が間接的ながら主張されよう。

文 献

- (1) 武藤高義・粥川浩宣・加藤弘毅, 油圧管路系の動特性シミュレーションにおける高速演算化の一手法について, 機論, **59**-568, C(1993), 3773-3777.
- (2) 中野和夫・吉本正彦, 粘弾性管壁をもった油圧管路の動特性, 計測自動制御学会論文集, **6**-3 (1970), 201-209.
- (3) 小口俊雄・中野和夫, 油圧用粘弾性管路における油撃, 油圧と空気圧, **9**-2 (1978), 120-126.
- (4) 武藤高義・ほか3名, 粘弾性油圧管路系の高速シミュレーション法に関する研究, 油圧と空気圧, **28**-6 (1997), 662-667.
- (5) Muto, T., Yamada, H. and Kato, H., A Fast and Convenient Method for Simulating Transient Response of Fluid Lines with Viscoelastic Pipe Walls, 12. Aachen Fluid-technisches Kolloquium, *Band 2* (1996), 257-268.
- (6) 武藤高義・ほか3名, 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, 機論, **55**-490, C(1987), 1213-1217.
- (7) Zhao, T., Peng, G. and Xu, Y., A Study on Basic Method of Time Domain Simulation of Fluid Transmission Lines, *First JHPS Int. Symp. Fluid Power Tokyo*, (1989), 61-66.
- (8) Brown, F. T., The Transient Response of Fluid Lines, *ASME J. Basic Engineering*, **84**-4 (1962), 547-553.