

油圧管路の動特性実験による高周波用瞬時流量測定法の検討*

中野和夫**, 横田真一**, 宮本 力***

A Study of Instantaneous Flow Rate Measurement in a High-Frequency Region, Based on Hydraulic Pipe Line Dynamics

by Kazuo NAKANO, Shinichi YOKOTA, and Tutomu MIYAMOTO

Concerning the dynamic characteristics of oil hydraulic pipe lines, experimental research from the view point of focusing on the unsteady flow rate through a pipe is insufficient because of the lack of adequate flowmeters. The authors develop a new system to measure the unsteady flow rate of oil through a circular pipe. The sampling frequency of the measurement is 1.28 kHz. The frequency responses and the transient responses of the oil hydraulic pipe lines are obtained by measuring the flow rate through a certain cross-section of the pipe and the pressure at the section simultaneously. The experimental results are compared with the theoretical results, which are calculated by making use of the so-called frequency dependent friction model. As a result, it is verified for the first time that the theory predicts the rate of the unsteady flow of the line quite accurately. At the same time, it is ascertained that the accuracy of the instantaneous flow rate measuring system is sufficient for the general dynamic test of oil hydraulic circuits and equipment.

Key Words : Fluid Power system, Hydraulic Pipe Line, Dynamic Characteristics, High-Frequency Unsteady Flow Rate Measurement, Unsteady Laminar Flow, Laser Doppler Velocimeter

1. 緒 言

液体で満たされた管路の動特性に関しては, Oldenburger⁽¹⁾ らや, Brown⁽²⁾ らにより, Navier-Stokes 方程式を基礎として, 2点間の圧力と流量の関係を4端子網の伝達マトリックス形で表した理論的な研究が行われ, その後実験との比較がなされてきており, その圧力測定のみからみた管路の動特性に関しては非定常層流の管摩擦を考慮したこれらの理論が実験結果とよく合うことが知られている^{(1)(3)~(6)}.

これに対し, Oldenburger⁽¹⁾ らはその論文のなかで圧力流量間の周波数特性を測定したとしているが, その流量測定の手段があきらかではない。

最近, 流体を水として管路を通過する瞬時流量を管内の流速から計測する手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾が提案され, 比較的低周波の場合についてよい結果が得られたことが報告されている。しかし, より高周波における流量計測への適用については, 十分な検討がなされていない。

本研究ではつぎのことを目的としている。

(1) 境界条件の定まった管路内のある断面における, 圧力と中心流速の間の高周波領域の特性を両者の測定から求め, 従来の理論式の妥当性を確認する。

(2) 文献(8)の瞬時流量計測システムの演算の高速化を実現し, (1)の検討結果を基礎として, 応答の速い流量計測システムの提案を行う。

2. 管路系モデルおよびその基礎式

流体が作動油のようなニュートン粘性流体で, 流れが助走区間外層流に対する運動方程式はN-S方程式より, 次式で与えられる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{r \partial r} \right) \dots\dots\dots (1)$$

圧縮性を考慮した連続の方程式は, 次式で与えられる。

$$\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, u は軸方向流速, μ は粘度, ρ は密度。

上流端流量を q_u , 下流端付近測定点の圧力を p_d , 流量を q_d とおけば, 式(1), (2)より, 管路上流と下流間の伝達特性は次のマトリックス形で与えられる⁽¹⁾。

* 昭和60年11月4日 中国四国支部・九州支部合同徳島地方講演会において講演, 原稿受付 昭和60年5月13日。

** 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田 4259)。

*** 正員, 京セラ(株)三重伊勢工場 (〒516 伊勢市下野町 600)

$$\begin{pmatrix} P_u(s) \\ Q_u(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \lambda l, & Z_0 \sinh \lambda l \\ \frac{1}{Z_0} \sinh \lambda l, & \cosh \lambda l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_a(s) \\ Q_a(s) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $P(s)$ 、 $Q(s)$ は p 、 q のラプラス変換形、また、

$$\lambda = \frac{s}{c} \left[1 - \frac{2J_1\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}{ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)} \right]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_0 = \frac{\rho c}{\pi a^2} \left[1 - \frac{2J_1\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}{ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)} \right]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 a は管半径、 c は管内を伝わる音速、 l は管路長、 ν は動粘度、 J_n は第1種 n 次ベッセル関数を表す。

上流端が一定圧力の場合を考える。あらためて、 P 、 Q を変動分とよみかえると、 $P_u(s)=0$ となり、 Q_a と P_a 間の伝達関数 $G_1(s)$ として次式が求まる。

$$G_1(s) = \frac{Q_a(s)}{P_a(s)} = \frac{-1}{Z_0 \tanh \lambda l} \quad \dots\dots\dots (6)$$

3. 流量高速演算システム

本研究で用いる文献(8)の瞬時流量計測手法の原理は簡単に述べると、円管内層流の動的挙動が実験的に確かめられている助走区間外の管断面内の一点(管中心)の流速とその断面を通過する流量間の関係式[これは式(1)から求まる]を基にして、管中心流速と流量間の伝達関数を求め、そのラプラス逆変換により得られる重み関数を用いて、流量を測定しようとする断面上の管中心流速の測定値とのたたみこみ積分を実時間で実行することにより、その管横断面を通過する瞬時流量を時々刻々算出するものである。

その重み関数 $w(t)$ は次式で与えられる⁽⁸⁾。

$$w(\bar{t}) = \delta(\bar{t}) + w_1(\bar{t}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$\begin{aligned} w_1(\bar{t}) = & \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ -4 + \frac{2\beta_i}{J_1(\beta_i)} (1 - 4\bar{t}) \right\} \\ & \times \exp(-\beta_i^2 \bar{t}) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{J_1^2(\beta_i)} \{ -2\beta_i^2 \bar{t}^2 \\ & + (\beta_i^2 + 2)\bar{t} - 1 \} \exp(-\beta_i^2 \bar{t}) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{t} = \nu t / a^2$ 、 $\beta_i (i=1, 2, 3, \dots)$ は J_0 の零点、 $\delta(t)$ はデルタ関数。

この式をマイクロコンピュータシステムで処理できるように、時間に関して離散値化すると、次式のように書ける⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned} q(n\Delta T) = & \pi a^2 u_c(n\Delta T) \\ & + \pi a^2 \sum_{i=1}^N w_i \left(i \frac{\nu}{a^2} \Delta T \right) \frac{\nu}{a^2} \Delta T u_c(n\Delta T - i\Delta T) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで u_c は中心流速、 ΔT はサンプリング周期、 N はたたみこみ積分に用いられる測定データの個数である。

文献(8)では式(9)の演算に16.6 msを要していた。それを高速化して1 ms以内で行える、図1に概略を示す演算回路を新たに開発した。

高速乗算器とダイレクトメモリアクセスコントローラ(DMAC)による積和算専用処理回路を新たに設けることにより積和算専用高速処理回路を試作し、1回の積和を2マシンユニット(1マシンユニットは本研究では1.08 μ s)で実行することが可能となった。すなわちCPUから切りはなすことができるメモリとDMACのセットを2組用意し、メモリBにはあらかじめ重み関数値 $[w_i(i\Delta T)]$ 200個を格納しておく。メモリAには、時々刻々システムに取り込まれる管中心流速データを順次入れ、最も古いデータがひとつ捨てられる。つぎにCPUとのアドレスおよびデータバスラインをきりはなし、2台のDMACによりAとBのメモリから積和算処理回路へ、システムクロックに同期して順次並列にデータを高速転送する。乗算器は8 $\times$ 8 bit(MMI67558)を用い、乗算自体は、150 nsで終了し、タイミングをわずかに遅らせて、その結果はフリップフロップにラッチされ、前項までの結果に加算される。これはメモリA、Bにそれぞれ蓄えられている200個のデータについて行われる。この式(9)で示される一連の演算を本研究では約430 μ sで行うことができ、これにCPUによるデータとりこみなどの時間を合わせて、サンプリング周期0.7 msとすることができた。

4. 実験

管中心流速 U_c とその管横断面通過流量 Q_a との間の伝達関数は式(1)より算出でき⁽⁸⁾、それを $Q_a = G_2(s)U_c$ と表しておく。すると下流端圧力と中心流速の関係は次のようになる。

$$U_c = \frac{G_1}{G_2} P_a \quad \dots\dots\dots (10)$$

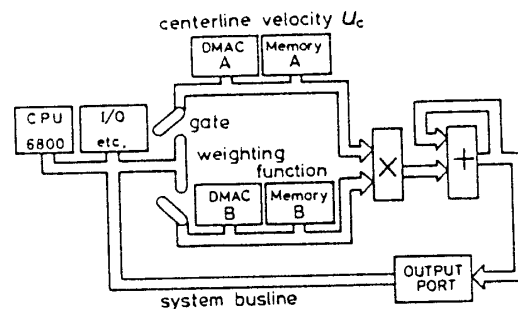


図1 積和算専用高速演算回路

この理論式と、 P_d と U_c の実験結果を比較して、理論式の妥当性を検討すればよいが、本研究では、 $G_2 U_c = G_1 P_d$ の形で U_c と P_d について実験結果と比較する。左辺の $G_2(s) U_c = Q_d$ の演算に 3 章の流量演算システムを用いる。

4.1 実験装置 2 章で述べた油圧管路系の動特性実験のための、試作した流量高速演算システムを組み込んだ装置の概略を図 2 に示す。圧力一定の境界条件を保つため、管路上流端には容積 10 L のアキュムレータを取りつけてある。実験に供する銅管は、上・下流間の圧力測定点間距離が 491.0 cm と 665.5 cm の 2 種類を用意した。管内径は 13.94 mm で、銅管の厚さは 2.0 mm である。

本研究では下流端にとりつけられたサーボ弁の上流に流速測定用の小窓を設けてある。その小窓は外径 30 mm、内径 13.94 mm、長さ 40 mm の透明アクリル管で、その内側を銅管の内径と $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内の精度で同一に加工し、上・下流側の 2 本の銅管とつぎ合わせ、中心軸を十分な精度で合わせることににより、銅管とのつなぎ目で流れが乱されないように十分配慮している。この透明小窓内の中心流速 U_c をレーザドップラ流速計 (L.D.V.) により測定する。その結果から 0.78 ms 間隔で順次流量を求める。流速測定用の小窓の直前に半導体圧力変換器を設け、その出力は極低ドリフトブリッジアンプ ($0.1 \mu\text{V}/\text{K}$) を介して A-D 変換器により、流速と同一のタイミングでマイクロコン

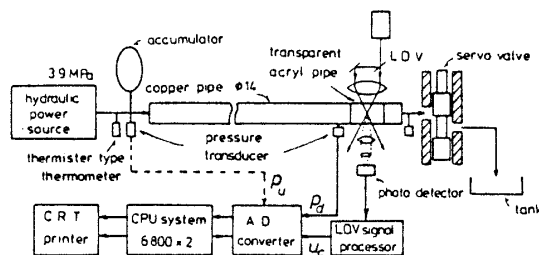


図 2 実験装置

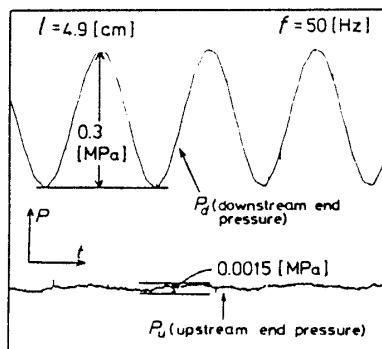


図 3 上下流端圧力波形

ピュータ内のメモリにとりこむことができるようになっている。

下流端のマニホールドにとりつけたサーボ弁 (東測 3F30L) のスプールをある動作点を中心に変位させることで、管路系に圧力流量変動を与える。サーボ弁に正弦波状の信号を印加したときの圧力波形例を図 3 に示すが、境界条件としての上流端の圧力変動は、300 Hz までは下流側変動の 0.5% 以下に押さえられていることを確認した。

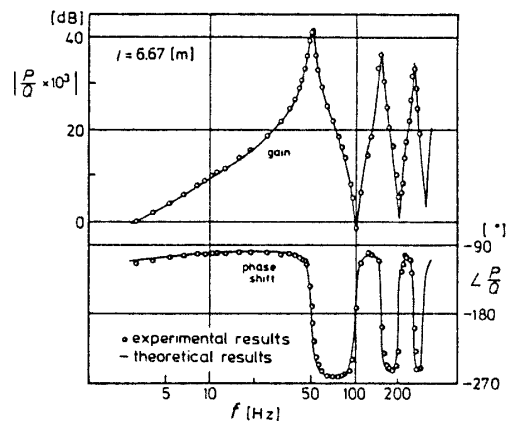
4.2 周波数応答実験 油温は上流端で $306 \pm 0.5\text{K}$ とし、上流端圧は 3.9 MPa ($40 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) に設定した。動作点としての平均流量は手持ちの L.D.V. の測定可能範囲に合わせて $25 \text{ cm}^3/\text{s}$ とした。下流端サーボ弁への入力電流は、流量変化の振幅がごく低周波で $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ 程度となるように調整した。

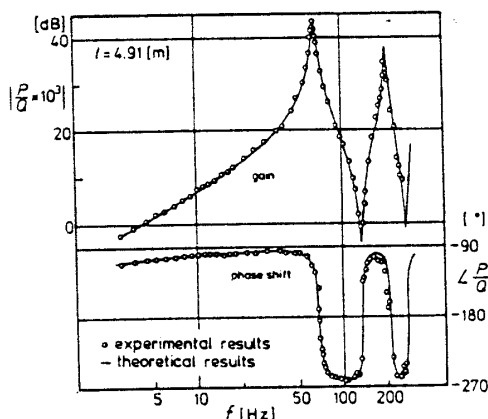
まず中心流速を測定する管横断面上で定常流速分布が十分発達した助走区間外層流のボアズイユ流れの流速分布になっていることを確認し、その中心流速が管断面平均流速 (流量に比例) の 2 倍になっていることをストップウォッチによる体積法と容積分積算流量計 2 台を併用して確かめた。

つぎに、サーボ弁への入力周波数を順次変えて実験を行った。圧力変換器からの圧力データと L.D.V. システムからの中心流速データを演算処理システム内に取り込み、中心流速データからは実時間で瞬時流量に相当する量を求めている。

図 4 は管路長 $l=6.67 \text{ m}$ の場合の圧力流量周波数応答実験結果である。横軸には実周波数、縦軸には流量に対する圧力のゲインと位相ずれをとって示してある。実験結果は白丸印、式 (6) による理論結果は実線で示してある。

理論値と実験結果は、ゲインにおいては 40 dB (100 倍) の変化があるにもかかわらず、ゲイン、位相とも

図 4 圧力流量周波数特性 ($l=6.67 \text{ m}$)

図5 圧力流量周波数特性 ($l=4.91$ m)

200 Hz を超える高周波領域までよく一致していることがわかる。

また管路長 $l=4.91$ m の場合についても、図5に示すように、同様の結果を得ている。

このことは圧力 P_a と管中心流速 U_c との間の関係を示す理論が高周波でも十分に成り立つことを示している。

4.3 過渡応答実験 つぎに過渡状態に対する検討を行う。下流端のサーボ弁のスプールをある動作点を中心に周期の比較的長い (0.3 s) 方形波状に変化させ、そのときの圧力と管中心流速を測定し、 p_a と q_a を求めた。その波形を図6に示す。下段の重なっている二つの波形のうち比較的ノイズが多い波形が流量高速演算システムで求めた流量波形である。

ここで、管路系のモデルとして文献(1)の理論を基礎として非定常層流管摩擦を考慮した Zielke⁽¹⁾ の式を用いて、特性曲線法により、同時に記録された圧力波形から通過流量を求めることができる。その結果を図6上に示す。上段の圧力波形から特性曲線法を用いて計算された流量波形は下段のノイズの少ないほうの波形であり、中心流速から演算により求めた流量波形とよく一致しているといえる。ただしこの出力波形にノイズが多く重畳しているのは次の理由による。手持ちのレーザ発信器自体のノイズが多かったことと、油中のレーザ光の散乱がいくぶん不足ぎみであったことなどからであり、これらは今後改良される余地は十分にある。

この実験結果は過渡的な状態においても圧力 p_a と管中心流速 U_c との間の関係を示す従来の理論が妥当であることを示している。

5. 結 論

本研究で得られた成果をまとめるとつぎのとおりで

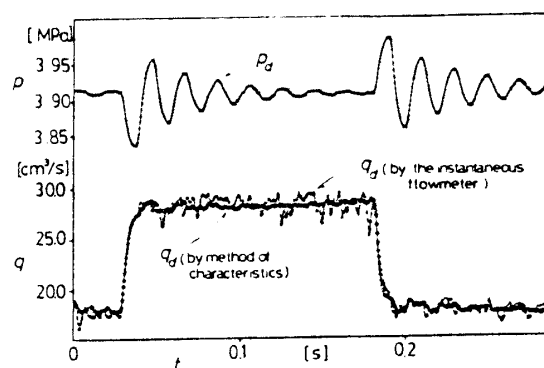


図6 圧力流量過渡応答波形

ある。

(1) 圧力と管中心流速の両方の測定により高周波における両者間の動特性を検討した結果、100 Hz をこえる高周波においても圧力と管中心流速の間の関係を示す従来の理論が十分に成り立つことが確かめられた。

(2) このことから、低周波についてはすでに著者らにより確かめられている、管中心流速から演算を介して流量を求める瞬時流量計測手法が高周波の流量変化に対しても適用できるひとつの根拠が得られた。

(3) 高周波で変化する流量を実時間で算出するためにサンプリング周期 0.78 ms で時々刻々瞬時流量を算出できる演算システムを新しく開発した。

これまで測定が困難であった油圧回路中の非定常流量の測定に本手法を適用することにより、今後の油圧機器、システムの動特性の試験、研究に大いに役立つことが期待される。

終わりに本研究を進めるに当たり、(株)吉田工業の野見山尚士氏にアクリル管の内面研摩に関し技術的助力を得たことと、装置の試作に羽太芳郎氏をはじめとする本学精密工学研究所附属工場の方々の助力を得たことを付記し謝意を表します。

文 献

- (1) Oldenburger, R. and D'Souza, A.F., *Trans. ASME, Ser. D*, 86-3 (1964), 589.
- (2) Brown, F. T., *Trans. ASME, Ser. D*, 84-3 (1962), 547.
- (3) Zielke, W., *Trans. ASME, Ser. D*, 90-3 (1968), 109.
- (4) Rouleau, W.T., ほか1名, *Trans. ASME, Ser. D*, 89-3 (1967), 174.
- (5) 市川・佐藤, 機論, 33-252 (昭42), 1232.
- (6) 高橋・池尾・高橋, 機論, 39-320 (昭48), 1261.
- (7) 内山・箱守, 計測自動制御学会論文集, 18-7 (昭57), 653.
- (8) 中野・横田・植山, 計測自動制御学会論文集, 20-5 (昭59), 421.