管路の圧力流量間の動特性を利用した非定常流量計測手法*

(2点の圧力を用いる手法)

横田 眞一^{*1}, 金 道泰^{*1}, 中野 和夫^{*1}

An Approach to Unsteady Flow Rate Measurement Utilizing Dynamic Characteristics between Pressure and Flow Rate along a Pipeline (A Method Using Pressures at Two Separated Points)

Shinichi YOKOTA, Do-Tae KIM and Kazuo NAKANO

The paper describes an approach to estimating unsteady flow rate through a pipe in real time. In this method, the unsteady flow rate is estimated by using hydraulic pipeline dynamics, and measured pressures at two points (upstream and downstream section) distant by a finite length along the pipeline. By scheming the high-speed operations of convolutions between the weighting functions and measured pressure data, data processing in a microcomputer system is achieved in real time using exclusive precalculated maps. The weighting functions are obtained by the application of the inverse fast Fourier transform from the transfer functions which are derived from the transfer matrix. Under unsteady laminar oil flow, good agreement between the estimated and measured flow rate waveforms illustrates the validity of the method proposed here.

Key Words: Unsteady Flow Rate Measurement, Fluid Power Systems, Hydraulic Pipeline Dynamics, Real Time Data Processing System

1. ま え が き

最近流体制御の分野において、マイクロエレクトロニクスの急速な発展に伴いメカトロニクス化あるいはインテリジェント化が進んでおり、これに対応できるように機器やシステムの動特性の向上が望まれている。流体制御システムの動特性を解明するためには、管路や機器内の任意位置の断面を通過する非定常流量を応答性よく計測することが重要な課題となっている。

著者らは、これまでに管路の圧力と流量間の動特性を利用して、管路上の離れた2点における二つの変量(圧力と流量)の測定値を用いて、ある任意の断面を通過する非定常流量を応答性よく求める二つの手法(遠隔計測, 準遠隔計測)を提案し, 実験を通して検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。これらの手法を用いることにより, 流体制御システム内の管路や機器内の非定常流量を測定したい位置に直接流量計を挿入することが困難である場

合でも, その断面を通過する非定常流量を遠隔的に推定することが可能である。

上記の手法を用いて, 管内あるいは機器内の任意の位置を通過する非定常流量を測ろうとする際に, 現状においては, 精度と応答性に優れた簡便な非定常流量計が手に入れにくい点が障害となる。

本報では, 非定常流量に比べてその測定が比較的容易である圧力測定のみを用いて, 管路上の離れた2点の圧力を直接測定し, その2点間の圧力流量間の動特性を利用して, 圧力測定点の断面を通過する非定常流量を求める手法について検討を行う。Leeらは⁽³⁾同様の原理を用いて, 長い管路両端の圧力測定値から有限差分法を用いて流量をオフラインで推定しているが, 非定常流量測定実験および応答性などについては十分な検討がなされていない。ここでは, とくに非定常流量の実時間計測などの実用化の面について検討を行う。

2. 非定常流量計測の原理

2.1 計測原理 この手法は, 図1に示すような管路系において, 上流圧力 $p_u(t)$ と長さ L だけ離れた下流圧力 $p_d(t)$ を直接測定し, その2点間の動特性を表す伝達マトリックスを変形してつぎの管路の伝達マ

* 平成元年11月16日 日本油空圧講演会および平成2年11月2日 北海道支部第31回講演会において講演, 原稿受付平成2年12月10日。

^{*1} 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町4259)。

トリックスに基づいて、上流流量 $q_u(t)$ あるいは下流流量 $q_d(t)$ を実時間で推定するものである。

$$\begin{pmatrix} Q_u(s) \\ Q_d(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_0(s) \cdot \tanh \Gamma(s)} & \frac{-1}{Z_0(s) \cdot \sinh \Gamma(s)} \\ \frac{1}{Z_0(s) \cdot \sinh \Gamma(s)} & \frac{-1}{Z_0(s) \cdot \tanh \Gamma(s)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_u(s) \\ P_d(s) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、管内の非定常な流速分布の変化を考慮に入れた場合の管路の伝ばオペレータ $\Gamma(s)$ と管路の特性インピーダンス $Z_0(s)$ は、次のように与えられる。

$$\Gamma(s) = \lambda(s) \cdot L \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda(s) = \frac{s}{c} \cdot \left\{ 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu} J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right\}^{-1/2}$$

$$Z_0(s) = \frac{\rho c}{\pi a^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu} J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right\}^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a は管半径、 c は管内を伝わる音速、 $J_0(x)$ と $J_1(x)$ はそれぞれ第 1 種零次および一次ベッセル関数、 $j = \sqrt{-1}$ 、 L は管路長、 s はラプラス演算子、 ν は油の動粘度、 ρ は油の密度を表す。また大文字 P 、 Q は圧力 p と流量 q の変動分についてのラプラス変換、下添字 u は管路の上流、 d は管路の下流を表す。

ここでは、主に管路上流を通過する非定常流量の推定について検討を行う。この場合、式(1)より、管路上流を通過する流量 $q_u(t)$ は、ラプラス領域で、次のように与えられる。

$$Q_u(s) = G_u(s) \cdot P_u(s) - G_d(s) \cdot P_d(s) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $G_u(s)$ は上流圧力と上流流量間の伝達関数、 $G_d(s)$ は下流圧力と上流流量間の伝達関数であり、次式で与えられる。

$$G_u(s) = 1 / \{ Z_0(s) \cdot \tanh \Gamma(s) \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$G_d(s) = 1 / \{ Z_0(s) \cdot \sinh \Gamma(s) \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 2 (a)、(b) は式(5)、(6)で $s = j\omega$ において伝達関数の周波数特性を求めた一例を示したもので、図中の実線は管路長 $L = 170$ cm、管半径 $a = 0.7$ cm、油の動粘度 $\nu = 0.4$ cm²/s (油温 35°C) の場合についての計算結果である。横軸には周波数、縦軸にはゲインと位相をとって示した。

図 1 流体管路系

時間領域における管路上流を通過する流量 $\hat{q}_u(t)$ は、式(4)をラプラス逆変換することにより、次のたたみこみ積分の形で与えられる。

$$\hat{q}_u(t) = \int_{-\infty}^t g_u(t-\tau) \cdot p_u(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^t g_d(t-\tau) p_d(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $g_u(t)$ 、 $g_d(t)$ は伝達関数の時間領域における重み関数を表す。

また、式(7)のたたみこみ積分を時間に関して差分化し、次の式(8)をマイクロコンピュータシステムを用いて実時間で実行する。

$$\hat{q}_u(n\Delta T) = \sum_{i=0}^{N-1} g_u(n\Delta T - i\Delta T) \cdot p_u(i\Delta T) \Delta T - \sum_{i=0}^{N-1} g_d(n\Delta T - i\Delta T) \cdot p_d(i\Delta T) \Delta T \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ΔT はサンプリング時間間隔、 N はたたみこみ積和を実行する項数であり、たたみこみ積和を行う時間 T_0 は $\Delta T \times N$ で与えられる。

2・2 重み関数の誘導 本手法の原理を用いて、非定常流量の実時間計測を実現するためには、伝達関数の時間領域における重み関数（デルタ関数入力に対する応答） $g_u(t)$ 、 $g_d(t)$ を求める必要がある。式(5)、(6)を直接ラプラス逆変換することにより重み関数を

図 2 伝達関数 $G_u(s)$ 、 $G_d(s)$ の周波数特性

求めることは可能であるが、その計算が複雑で実用的な面では問題が多い。ここでは、比較的低周波数に限定して(1 kHz程度まで)、次のような高速フーリエ逆変換法(IFFTと略す)を用いて、簡単でかつ精度のよい近似重み関数を求めた。

$$g_u(k\Delta T) = \Delta f \cdot \sum_{n=0}^{N_s-1} G_u(2\pi j n \Delta f) \times \exp(2\pi j k n / N_s) \dots\dots\dots (9)$$

$$g_d(k\Delta T) = \Delta f \cdot \sum_{n=0}^{N_s-1} G_d(2\pi j n \Delta f) \times \exp(2\pi j k n / N_s) \dots\dots\dots (10)$$

$$k=0, 1, 2, 3, \dots\dots N_s-1$$

ここで、 N_s はサンプリング数、 ΔT はサンプリング時間間隔、周波数領域におけるサンプリング間隔 $\Delta f = 1/(N_s \cdot \Delta T)$ で与えられる。実際に重み関数を求める際に、Sande-TukeyのFFTアルゴリズムを用いた⁽⁴⁾。

図3(a)、(b)には、一例として管路長 $L=170$ cmの場合について近似重み関数を求めて示したものである($\Delta T=0.2$ ms, $N_s=2048$)。またこの近似重み関数を用いて、入力として正弦波を加えたときのたたみこみ積分を行い、入出力間のゲインと位相を求めた結果を、図2(a)、(b)の中に○印で示した。それらの結果は式(5)、(6)より求めた伝達関数の周波数特性の理論値(実線)とよく一致しており、ここで求めた近似重み関数の妥当性を示している。

図3 重み関数 $g_u(t)$, $g_d(t)$

3. 実験

3.1 実験装置 実験装置の概略を図4に示す。管路上の2点の圧力 $p_u(t)$ と $p_d(t)$ の情報は、上流と下流に設けてある半導体形圧力変換器の差圧計の一方より得られる。また直接測定した流量値 $q(t)$ との応答性などを比較検討するために、400 Hzを超える応答性をもつ円筒形絞り瞬時流量計⁽⁵⁾(以下CCFMと略す)が管路上流(CCFM 1)と下流(CCFM 2)に取り付けてある。CCFM 1とCCFM 2に用いた円筒形絞りの形状は細管部の内径 $d=2.5$ mm、長さ $l=15$ mmの同一寸法のものである。下流端のマニホールドには管路系に変動流量を生じさせるためのサーボ弁を設けてある。

3.2 実験結果および考察 図5は、サーボ弁に10 Hzのステップ入力を加えたときの圧力と同時に測定した流量記録波形例を示す。横軸は時間、縦軸は圧力と流量である。実験条件として、管路長 $L=170$ cm、油温 35°C で動粘度 $\nu=0.4$ cm²/sの作動油を用いて、

図4 実験装置概略

図5 流量応答記録波形例
(方形波入力 10 Hz)

動作点の流量 $35.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ および圧力を 3.8 MPa とした。図の最上段と二段目は入力である管路の上流圧力 $p_u(t)$ と下流圧力測定値 $p_d(t)$ である。三段目は式(8)のたたみこみ積和を浮動小数点演算で行った場合 ($\Delta T = 0.2 \text{ ms}$, $N = 1250$) の推定された上流流量波形 $\hat{q}_u(t)$ (推定値はハットをつけて示す) である。本手法により推定された流量値 $\hat{q}_u(t)$ との応答性などを比較するために、図の最下段には CCFM 1 から直接測定した上流流量波形 $q_u(t)$ を示した。また四段目の流量波形は $\hat{q}_u(t)$ と $q_u(t)$ を同じ座標上に重ねて示したものであり、両方の流量波形がよく一致していることがわかる。

また本手法は、はじめに述べたように、上流と下流の圧力測定値から管路下流を通過する流量 $q_d(t)$ に関しても同様に推定することが可能である。その結果の一例を図6に示す。図の上段は図5と同様の実験条件で、CCFM 2 より測定された下流流量波形 $q_d(t)$ 、中段は図5に示した上流と下流の圧力測定値 $p_u(t)$, $p_d(t)$ より推定された下流の流量波形 $\hat{q}_d(t)$ である。また下段には流量波形 $\hat{q}_d(t)$ と $q_d(t)$ を同じ座標上に重ねて示した。両方の流量波形がよく一致しており、管路下流を通過する流量についても応答性よく推定で

図6 流量応答記録波形例

 図7 流量応答記録波形例
(方形波入力 40 Hz)

きることがわかる。

図7は、管路長 $L = 58 \text{ cm}$ と比較的短い場合の記録波形例である。管路の上流と下流の圧力測定値から推定された流量波形 $\hat{q}_u(t)$ と直接測定した流量波形 $q_u(t)$ を比較してみると互いによく一致している。

これらの結果より、式(8)のたたみこみ積和を浮動小数点演算で行った場合、ここで提案した流量計測手法は十分な精度と応答性をもつことを確認することができた。次節では、たたみこみ演算の実時間化のための高速化について考察を行う。

3.3 実時間流量計測システムの検討 本手法を用いて、機器内の任意位置の断面を通過する非定常流量を実時間で推定するためには、サンプリング時間 ΔT 、たたみこみ積和を行う項数 N およびデータの離散値化 (bit) を定める必要がある。

たたみこみ積和実行時間 $T_0 (= \Delta T \times N)$ について考えると式(8)のたたみこみ演算を実時間で行うためには、重み関数がある有限時間 T_0 で打ち切らざるをえない。この時間 T_0 の選定について考察する。図3よりわかるように、この場合 ($L = 170 \text{ cm}$) は 250 ms を超えると重み関数の値は十分無視できるほど小さくなる。図5の結果はこの値 $T_0 = 250 \text{ ms}$ ($N = 1250$, $\Delta T = 0.2 \text{ ms}$) を用いている。この T_0 については、管路の

(a) 重み関数包絡線の対数減衰

(b) たたみこみ積和演算の打ち切り時間

図8

図 9 流量演算結果

図 10 高速演算用テーブル

動特性にかかわるパラメータ（動粘度など）によって影響される。打ち切り時間 T_0 に対する目安を得るため、次のように管路長 L と音速 c との比 $T_c = L/c$ および管半径の自乗 a^2 と油の動粘度 ν との比 $T_\nu = a^2/\nu$ を用いて検討を行った。重み関数の減衰のしかたをパラメータ T_ν を変えて片対数グラフにプロットすると図 8 (a) のようになる。図 3 に示した場合 ($T_c = 1.26$ ms, $T_\nu = 1.23$ s) の T_0 に対応する重み関数の振幅の対数減衰を求めると $\log(g_u(t)) \approx 0.8$ となる。この値を T_0 選定の目安として T_0 を決定すると図 8 (b) のようになる。図 8 (b) の□は $T_c = 1.26$ ms ($L = 170$ cm, $c = 1.35 \times 10^3$ m/s), ○は $T_c = 0.43$ ms ($L = 58$ cm, $c = 1.35 \times 10^3$ m/s) の場合である。

次にデータの離散値化による影響について検討する。サンプリング時間間隔 ΔT を変化させた場合の演算結果を図 9 に示す。図の上段は図 5 に示した同様の実験条件で、CCFM 1 より測定された流量波形 $q_u(t)$, 中段はサンプリング時間間隔 $\Delta T = 0.8$ ms とし、たたみこみ演算を浮動小数点演算で行った場合の結果である。これは $\Delta T = 0.2$ ms とした場合と同様である。両方の流量波形 $\hat{q}_u(t)$ と $q_u(t)$ を比較してみるとここで示したサンプリング時間間隔の範囲では、 $\hat{q}_u(t)$ と $q_u(t)$ は互いによく一致していることがわかる。

また実時間演算を実行するためには、式 (8) の右辺

の第 1 項と第 2 項の積和算について $2N$ 回の乗算と加算が必要となる。このため、計算時間に長時間を要し実時間化が難しい。そのため、ここでは、文献 (2) と同様につぎのようなマップを用いることにより計算の短時間化を図った。すなわち、1 サンプル時間以内で、1 時刻の $\hat{q}_u(n\Delta T)$ を求める流量演算を終了させるために、図 10 に示すように、8 bit $\times$ 8 bit = 16 bit の乗算結果をすべてメモリ上に格納しておき、乗算を行う代わりにこのテーブルを参照するだけですむ高速乗算マップを用い、256 $\times$ 256 の組合せについて、メモリ上にあらかじめ乗算結果をしまっておく。この演算手法を用いることにより、たたみこみ積和算はデータ移動と加算で行うことができ、ソフトウェアのみで高速演算処理を可能としている。

図 9 の最下段にはサンプリング周波数 1.25 kHz の実時間演算の結果得られた流量波形例 $\hat{q}_u(t)$ を示す。ここでは、 $\Delta T = 0.8$ ms, 項数 $N = 310$ とし、重み関数および入力データをそれぞれ 8 bit に離散値化した場合、図 9 に示した高速乗算演算マップを用いて、マイクロプロセッサを 80 286 (クロック 20 MHz) として、0.8 ms 以内でたたみこみ積和演算の結果が得られるようにしている。流量波形 $\hat{q}_u(t)$ と $q_u(t)$ を比較してみるとその応答性は実用上十分であると考えられる。

4. あとがき

本報では、管路上の 2 点の圧力測定値を用い、その 2 点間の圧力流量間の動特性を利用して非定常流量を実時間で求める手法を提案した。この手法は流量計を用いないですみ、簡便である利点がある。また円筒形絞り瞬時流量計を用いて、非定常流量比較実験を行い、その応答性、妥当性について検討した結果、本手法は実用上十分な精度と応答性をもつことを明らかにした。

文 献

- (1) 横田・金・中野, 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法, 油圧と空気圧, 21-2 (1990), 187.
- (2) 金・横田・中野, 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法 (第 2 報 実時間準遠隔瞬時流量計測手法の検討), 油圧と空気圧, 22-2 (1991), 169.
- (3) Lee, S. R. and Srinivasan, K., A Method for the Determination of Transient Hydraulic Flow Rates from Dynamic Pressure Measurement, ASME Paper, 87-WA/DSC-36 (1987).
- (4) 例えば, Brigham, E. O., *The Fast Fourier Transform*, (1974), Prentice-Hall.
- (5) 横田・井手・中野, 円筒形絞りを用いた瞬時流量計の高機能化, 機論, 53-489, B (1987), 1548.