シミュレーテッド音響インダクター†

鳥 越 一 平*

Simulated Acoustic Inductor†

Ippei TORIGOE*

A new device is proposed which simulates an acoustic inductor using active elements. The sound pressure at a certain point is picked up by a microphone. The medium there is vibrated by an piston at such a velocity as the medium should vibrate if there were a pipe. There is no difference between two cases from the acoustical point of view; the case the medium is vibrated by a piston and the case the medium within a real pipe is vibrating. A trial device was built which employed an electret microphone for picking up the sound pressure and a piezoelectric actuator for vibrating a piston. An experiment of the measurement of cavity capacity was performed with this device. The device was mounted on a container with an empty capacity of $62 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ to form an acoustic resonator. The capacity of the cavity was varied by filling with water and the resonant frequencies were measured. The results show that the trial device, although the actual dimension of the device is 12 mm in diameter and 70 mm in length, acts as an acoustic pipe with a length of 1200mm. Finally, the possibility of application of the simulated inductor to the measurement of other quantities is discussed.

Key Words : simulated inductor, acoustic inductance, volume measurement, capacity measurement, gas density, microphone.

1. はじめに

音圧を電圧に、媒質の体積速度を電流に対応させると、音響系は電子回路によって等価表現される。このとき、放射抵抗や粘性抵抗などは抵抗で、容器中の媒質のコンプライアンスはキャパシタンスで、媒質のイナータンスはインダクタンスで表現される。電子回路においては、演算増幅器を用いてインダクターを模擬する場合がある¹⁾。音響系においても、能動素子を使用すれば、同じことが可能である。パイプ中の媒質のイナータンスすなわち音響的インダクタンスを、等価的に実現する方法—シミュレーテッド音響インダクターを提案し、その計測への応用について述べる。

大きな音響的インダクタンスを音響系のみで実現するには、長いパイプを必要とする。また、パイプには、非常に太いものを用いない限り、かなりの大きさの粘性抵抗が伴う。さらに、同一のパイプを用いても、媒質のイナータンスと粘性抵抗は温度によって変化する。シミュレーテッド音響インダクターを用いると、大きな音響的インダクタンスをコンパクトに実現でき、音響抵抗の値も小さくしうる。また、音圧検出と能動素子に温度特性の安定した素子を用いれば、温度特性

の安定した音響インダクタンスを実現することが可能となる。

2. 原理

長さ l 、断面積 S のパイプ内の媒質の運動を考える (Fig.1)。パイプ内の媒質の質量が $\rho l S$ 、両端の圧力 P_A, P_B が媒質に及ぼす正味の力は $(P_A - P_B)S$ であるから、運動方程式は、管軸方向の媒質の変位を x として

$$\ddot{x} = \frac{1}{\rho l} (p_B - p_A) \quad (1)$$

となる。

Fig.1 Longitudinal motion of the medium within a pipe

いま、Fig.2 に示すように、ある点における音圧をマイクロホンで検出し、その点の媒質を、変位が

$$x = \frac{1}{\rho l S^2} (p_B - p_A) \quad (2)$$

† 第 39 回計測自動制御学会学術講演会で発表(2000・7)

* 熊本大学工学部 熊本市黒髪 2-39-1

* Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto-shi, Kumamoto

(Received November 26, 2001)

となるように断面積 S のピストンで加振したとする(式中の s はラプラス演算子を表す). このとき, その点を音響的にみれば, 長さ l で断面積 S のパイプがそこに開口している場合と全く等価である.

Fig.2 Principle of the simulated acoustic inductor

3. 実験

実際にシミュレーテッド音響インダクターが実現可能であることを, Fig.3 のような実験装置を製作して確かめた. 内径 12mm, 長さ 60mm のアクリルパイプ内にピストンを設置し, このピストンを積層圧電素子で駆動する. パイプ内のピストン直前の音圧 P_A は, 直径 6mm のエレクトレットコンデンサーマイクロホンで検出する. この音圧信号を, 演算増幅器による積分回路二つに通した後, 高電圧アンプで増幅して, 圧電素子の駆動電圧としている. いま, 音圧信号から変位信号までのゲインをまとめて k とおき, マイクロホンアンプの出力が音圧と等しくなるように電圧の単位を適当に選んでやると, ピストンの変位 x は

$$x = \frac{k}{s^2} (p_B - p_A) \quad (3)$$

と表わされる.(3)式を(2)式と比較すれば, この装置は,

$$\rho l = \frac{1}{k} \quad (4)$$

とした音響インダクタンスに等価となることがわかる.

Fig.3 Experimental apparatus

シミュレーテッド音響インダクターとしての動作試験に先立って, $P_A \approx 0$ とした状態で, P_B から x までの周波数特性を測定した. 変位 x はレーザー変位計で検出した. その結果を Fig.4 に示す. ゲイン特性は角周波数の二乗に反比例しており, この周波数範囲で, 音響インダクターとして動作すると考えら

Fig.4 Frequency response of the experimental apparatus from the input p_B to the displacement x of the piston

れる. 一方, 位相特性はほぼ一定値であるが, その値は -180 度よりやや小さい. これは, 主として, 積分回路を一次遅れ回路で近似したこと起因すると推測される. この位相特性から, シミュレーテッド音響インダクターが, 純粋なインダクターではなく, わずかな直列抵抗分を持ったインダクターとなることが予想される.

シミュレーテッド音響インダクターが原理通り動作することを確認し, またシミュレーテッド音響インダクターの計測への応用可能性を示す目的で, Fig.5 のような装置を構成して, 容器の容積を測定する実験を行なった. 容積が約 $62 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ (62 ml) の容器に Fig.3 のシミュレーテッド音響インダクターを取り付けた. 容器には, 直径 2mm, 長さ 6.5mm のオリフィスを設けてある. 実際のシミュレーテッド音響インダクターでは, 原理図には現れていない位相回転などが存在する. 前面に取り付けられる音響系の特性によっては, フィードバック系であるシミュレーテッド音響インダクターは不安定なシステムとなる可能性がある. 上記のオリフィスは, 低域でのゲインが大きく

Fig.5 Experimental setup for the measurement of cavity capacity

なりすぎるのを避けるために設けたものである。この実験装置の等価回路は Fig.6 のように表わされる。なお、オリフィスのインピーダンスを抵抗とインダクタンスで表わしたが、厳密にはどちらも周波数の関数となる²⁾。

Fig.6 Equivalent circuit for the experimental setup shown in Fig.5

容器に水を入れて容器容積 V_0 を変化させながら、共鳴周波数を測定し、容器容積 V_0 の $-1/2$ 乗に対してプロットした結果を Fig.7 に示す。図中の実線は、シミュレーテッド音響インダクターの代わりに、内径12mm長さ1200mmのパイプが取り付けられている場合の共鳴周波数を計算したものである。

Fig.7 A plot of the measured resonant frequency vs. $V_0^{-1/2}$

4. 考察

前節の実験によって、シミュレーテッド音響インダクターが確かにパイプの役割をすることがわかった。試作装置の全長は約70mmであるが、等価的に1200mmのパイプとして動作している。音響系の動作周波数が十分に低ければ、音響系は集中定数系で近似できる。しかし、動作周波数が高くなると、分布定数系としての取り扱いが必要となる。このため、音響系の設計において、動作周波数を低く選びたい場合がしばしば生じる。音響系にパイプが含まれているとき、一般に、パイプが長

い方が系の特徴周波数は低くなる。つまり、長いパイプを使用したい場合がしばしば起こることである。このような場合に、長いパイプをコンパクトに実現できるシミュレーテッド音響インダクターが有効である。

前節の実験では、シミュレーテッド音響インダクターの容器容積測定への応用を示した。容積既知の容器を準備して、この測定法を逆に使い、マイクロホンの感度校正に応用することもできる。シミュレーテッド音響インダクターは、容積に限らず、音響現象に関与する種々の流体量の計測に適用することが可能である。しかし、それらの計測法が十分な精度をもつためには、シミュレーテッド音響インダクターの等価長が十分な精度で実現されなくてはならない。このことは、音圧の検出とピストン変位(あるいは速度)の制御が高精度に行なわれる必要があるということである。たとえば、シミュレーテッド音響インダクターは圧力測定に応用することが可能である。しかし、音圧と変位を高精度に検出することは、圧力のみを高精度に検出するよりも、コスト上不利である可能性が高い。このような場合には、シミュレーテッド音響インダクターを利用するメリットは小さい。一般に、測定が難しい量、測定のために本質的に二つ以上のほかの量を検出する必要がある量において、シミュレーテッド音響インダクター利用のメリットが生じると言えるであろう。そのような測定量の一つとして、気体の密度がある。気体密度の測定へシミュレーテッド音響インダクターを適用するには、Fig.8のような構成をとればよい。シミュレーテッド音響インダクターに長さ L のパイプを取り付け、パイプの気柱共鳴周波数とヘルムホルツ共鳴周波数の両方を測定することで、密度を知ることができる³⁾。

最後に、本研究の実験を担当された熊本大学大学院自然科学研究科・大野昌嗣氏の労に対して謝意を表する。

Fig.8 Conceptual diagram of a density meter employing the simulated acoustic inductor

参考文献

- 1) Linear Applications Databook, AN-31 Op Amp Circuit Collection National Semiconductor (1986)
- 2) L.E.Kinsler and A.R.Frey: Fundamentals of Acoustics (1st. edition), John Wiley & sons (1950)
- 3) 大野, 鳥越: シミュレーテッド音響インダクターとその応用, 第39回 SICE 学術講演会予稿集, 303A-6 (2000)