油圧管内脈動流における修正慣性差圧法を使った 変動流量・圧力・インピーダンス同時測定の精度検証*

陳 恵 青^{*1}, 鷲 尾 誠 一^{*2}, 高 橋 智^{*2}

Discussions on Accuracy of Modified KDP Method Applied to Simultaneous Measurements of Unsteady Flow Rates, Pressures and Impedances for Pulsating Oil Flows in a Pipe

Huiqing CHEN^{*3}, Seiichi WASHIO and Satoshi TAKAHASHI

^{*3} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

When a liquid flow in a pipe is accelerated or decelerated, a differential pressure is kinetically induced between two separate sections of the liquid column. This fact has been utilized to measure an unsteady flow rate, and that way of measurement is called "Kinetic Differential Pressure (KDP) Method". In the present paper, the KDP method is modified so as to find oscillatory flow rates, pressures and hydraulic impedances simultaneously at any section in pulsating pipe flows of oil from the pressure data detected at two fixed sections of the pipe. Through being applied to measurements of impedances of a pipe with a closed end and a Helmholtz resonator, the modified KDP method has proved effective enough for practical use. In actual measurements, it turned out more recommendable from the viewpoint of accuracy to employ differential pressures obtained by electrical subtraction between outputs of the two pressure transducers than to rely upon pressure data alone.

Key Words: Differential Pressure, Pulsating Flow, Measurement, Flow Rate, Impedance, Oil Hydraulics

1. 緒 言

機械装置の動作予測, 性能改良, あるいは新規開発において, 数値シミュレーションは有力な選択肢であるが, それを有効とするためには, 使用する数学モデルの予測精度を知っておくことが肝要である。しかしながら油圧の分野では, その確認が十分でないままシミュレーションが行われる場合も多く, そうした状況が生まれる背景に, 実際に数学モデルの精度検証実験を行おうとしても容易でないという現実があると思われる。さらに著者らの認識によれば, 精度検証を難しくしている最大の要因は, 油圧機器の動特性モデル検証実験で必須となる変動流量, 変動差圧の測定が, 現場の技術者, 研究者にとって依然困難な仕事と見なされているところにある。

こうした認識を踏まえて, 著者らのグループはこれまでに実用的な変動流量・変動差圧測定法の提案^{①②}と, その方法を使った油圧機器数学モデルの精密化^{③④}に取り組んできた。具体的には, 初めに, 油の流れが

加速, 減速するとき, 流体慣性によって管路の2断面間に生じる差圧(慣性差圧と呼ぶ)と流量の間に成り立つ理論的關係を使って変動流量を求める方法について検討し, 締め切り弁下流管路で起こる液柱分離とその後の再結合過程で現れる階段状過渡変動流量の測定に適用して良好な結果を得た^①。またその時, 管路の160mm離れた2断面間で過渡的に変動する慣性差圧を, 差圧計ではなく, 2断面それぞれに付けた半導体圧力計の出力を電氣的に引き算して求め, それが変動差圧測定法として有効であることを確かめた。

次にこの慣性差圧式変動流量測定法を油の圧縮性を考慮した管路粘性波動理論に基づいて脈動流量測定に適用できるように修正し, 一樣管路の近接2断面間の差圧と一方の断面の圧力を使ってギヤポンプの吐出量脈動波形を測定した^②。さらにその後, この修正慣性差圧法を使って PWM 駆動用三方ボール弁^③, 流量制御弁^④, ポペット型直動リリーフ弁^⑤の動特性数学モデルの周波数応答による検証を行った。

開発に携わる油圧技術者・研究者は, 変動する流量や差圧, あるいは脈動インピーダンスの測定を要求される場面にしばしば遭遇すると考えられ, その時著者

* 原稿受付 2005年4月5日。

^{*1} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 正員, 岡山大学工学部。

E-mail: chen@keilab.mech.okyama-u.ac.jp

ら提案の上記方法は一つの有用な手段を与えるはずである。しかしながらこれまで実際に利用された例はあまり無く、その原因は同方法の信頼性、利便性がきちんと説明されていなかった点にあると思われる。本論文ではその反省に立ち、従来の方法を整理して、現場においても容易に導入できる実用性の高い簡便な測定技法、すなわち「管路の少し離れた2点の圧力データから、管路の任意断面の脈動流量・圧力、インピーダンスを同時に測定する方法」として提示し、その有効性と誤差の要因について検討を行う。同時に精度の劣化が生じる原因と、それを回避する方法も述べる。

2. 測定原理

円形断面管路における粘性液体の運動は、圧縮性を考慮すると一次元波動方程式で表され、それをラプラス変換して解けば、距離 L 隔たった管路の二断面の圧力と流量 $P_0(s)$, $Q_0(s)$; $P_L(s)$, $Q_L(s)$ (s はラプラス演算子) の間に次の関係が得られる⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} P_0(s) &= P_L(s) \cosh sF_i(z)T_L \\ &\quad + Z_i F_i(z) Q_L(s) \sinh sF_i(z)T_L \\ Q_0(s) &= Q_L(s) \cosh sF_i(z)T_L \\ &\quad + \frac{1}{Z_i F_i(z)} P_L(s) \sinh sF_i(z)T_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで $P(s)$, $Q(s)$ はそれぞれ圧力 $p(t)$, 流量 $q(t)$ (t は時間) のラプラス変換形であり、

$$\left. \begin{aligned} F_i(z) &= \left[\frac{I_0(z)}{I_2(z)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad z = \sqrt{\chi_0 s} \\ \chi_0 &= \frac{a^2}{\nu}, \quad T_L = \frac{L}{c}, \quad Z_i = \frac{\rho c}{\pi a^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。また式(2)で ν , ρ はそれぞれ液体の動粘度と密度, c は音速, a は管路半径であり, $F_i(z)$ の式に現れる $I_0(z)$, $I_2(z)$ はそれぞれ0次及び2次の変形された第一種ベッセル関数である。

式(1)を使えば、図1に示すような一様管路の僅かに離れた二断面Ⅰ, Ⅱの圧力 $P_1(s)$, $P_2(s)$ から、管路の任意断面Ⅲにおける圧力 $P_3(s)$, 流量 $Q_3(s)$, そしてインピーダンス $Z_3 = P_3(s)/Q_3(s)$ を求め得ることが理論的に導かれる (式(3)₂~(6)₂ 参照)。著

Fig.1 Pipe model

者らは以前、慣性差圧法によるギヤポンプ吐出量脈動の測定において、二つの圧力でなく、二断面間の差圧と一つの圧力を用いたが²⁾、原理的に言えば差圧の測定が必須という分けではない。

差圧 $\Delta P(s) = P_2(s) - P_1(s)$ を使う後者の場合と使わない前者の場合について、式(1)から導かれる修正した慣性差圧法の測定原理式を以下に示す。

差圧を使う場合

$$Q_3(s) = GQ_{\Delta p}(s)\Delta P(s) + GQ_{p2}(s)P_2(s) \quad (3)_1$$

$$\left. \begin{aligned} GQ_{\Delta p}(s) &= -\frac{\cosh sF_i(z)T_x}{Z_i F_i(z) \sinh sF_i(z)T_l} \\ GQ_{p2}(s) &= -\frac{\sinh sF_i(z)T_{x+l/2}}{Z_i F_i(z) \cosh sF_i(z)T_{l/2}} \end{aligned} \right\} \quad (4)_1$$

$$P_3(s) = GP_{\Delta p}(s)\Delta P(s) + GP_{p2}(s)P_2(s) \quad (5)_1$$

$$\left. \begin{aligned} GP_{\Delta p}(s) &= \frac{\sinh sF_i(z)T_x}{\sinh sF_i(z)T_l} \\ GP_{p2}(s) &= \frac{\cosh sF_i(z)T_{x+l/2}}{\cosh sF_i(z)T_{l/2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)_1$$

差圧を使わない場合

$$Q_3(s) = HQ_{p1}(s)P_1(s) + HQ_{p2}(s)P_2(s) \quad (3)_2$$

$$\left. \begin{aligned} HQ_{p1}(s) &= -\frac{\cosh sF_i(z)T_{x+l}}{Z_i F_i(z) \sinh sF_i(z)T_l} \\ HQ_{p2}(s) &= \frac{\cosh sF_i(z)T_x}{Z_i F_i(z) \sinh sF_i(z)T_l} \end{aligned} \right\} \quad (4)_2$$

$$P_3(s) = HP_{p1}(s)P_1(s) + HP_{p2}(s)P_2(s) \quad (5)_2$$

$$\left. \begin{aligned} HP_{p1}(s) &= \frac{\sinh sF_i(z)T_{x+l}}{\sinh sF_i(z)T_l} \\ HP_{p2}(s) &= -\frac{\sinh sF_i(z)T_x}{\sinh sF_i(z)T_l} \end{aligned} \right\} \quad (6)_2$$

3. 計算方法

上述の式(3)~(6)は周期性のある管内非定常流れの測定に適用できる。その場合、圧力波形 $\Delta p(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$ のフーリエ解析結果が

$$\left. \begin{aligned} \Delta p(t) &= \sum_{k=1}^m \Delta p^{(k)} \cos\{k\omega t + \phi^{(k)}\} \\ p_1(t) &= \sum_{k=1}^m p_1^{(k)} \cos\{k\omega t + \psi_1^{(k)}\} \\ p_2(t) &= \sum_{k=1}^m p_2^{(k)} \cos\{k\omega t + \psi_2^{(k)}\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

のように表されるならば (ω は周期変動の基本角周波数), 断面Ⅲにおける流量 $q_3(t)$, 圧力 $p_3(t)$ はそれぞれ式(3), (5)を使って求めることができる. そのやり方は, 例えば Δp と p_2 を用いて $q_3(t)$ を求めるのであれば, 次のようになる.

$$\begin{aligned} q_3(t) &= \sum_{k=1}^m \Delta p^{(k)} |GQ_{\Delta p}(jk\omega)| \cos\{k\omega t + \phi^{(k)} + \angle GQ_{\Delta p}(jk\omega)\} \\ &+ \sum_{k=1}^m p_2^{(k)} |GQ_{p_2}(jk\omega)| \cos\{k\omega t + \psi_2^{(k)} + \angle GQ_{p_2}(jk\omega)\} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし j は虚数単位 $\sqrt{-1}$ を表す.

修正慣性差圧法を実際に使おうとすると, 式(3), (5)の重み関数 ($GQ_{\Delta p}(jk\omega)$ など) に含まれる複素関数 $F_i(\sqrt{j}\chi_0 k\omega)$ の計算が課題となる. しかし, 例えば著者らが以前に開発した計算プログラム⁽⁶⁾ (<http://keilab.mech.okayama-u.ac.jp/research/wave/wave2e.html>) を使えば, 現場の技術者にとって実用上何ら障害はない.

4. 末端閉鎖直管を用いた精度検証

4. 1 インピーダンス測定

(1) 実験装置

修正慣性差圧法の有効性を検証しようとする, 理論的に予測可能な現象の測定に適用するか, もしくは別の手段による測定と比較するか, いずれかの方法を採用する必要がある. 検証のための実験管路として, はじめに図2に示すような鋼管 (内径 16.1mm, 長さ 4.56m) を用いる. 鋼管には, 100mm 離れた一対の圧力測定孔 (P_1 ; P_2) を軸方向に 1m ずつ隔て

て四箇所 (A, B, C, D) 設けてある.

まず測定孔 D に近い側の末端を閉鎖し, 図3のような油圧回路 (作動油: VG46) に組み込む. 回転式正弦波流れ発生器により 60~1000Hz の脈動を創り出し, A~D のいずれかの箇所に取り付けた 1 対の半導体圧力センサ (定格 3MPa, 固有振動数 40kHz 以上) で圧力波形を測定する. この時利用した圧力センサと測定孔の形状, 寸法を図4に示す. 著者らは従来からこの形状

Fig.2 Measuring pipe with 4 pairs of pressure holes separated by 0.1m

Fig.3 Oil hydraulic test circuit with pulsation produced by rotary sinusoidal flow generator

Fig.4 Shape and dimensions of pressure holes

Fig.5 Frequency characteristics of open-end impedance of a pipe with its end closed

- Comparison between theoretical prediction and measurements by MKDP method with and without use of Δp -

の測定孔を変動圧力測定に用いており、それが脈動圧力測定にもたらす誤差は、今回の測定周波数範囲で他の要因による実験誤差より十分小さいことを確かめている。

最大サンプル周波数 1MHz、同期 8 チャンネル 12 ビットの AD 変換器を使って記録した圧力波形データから、管の入口における脈動インピーダンスを求め理論値と比較する。この時、末端閉鎖管入口における脈動インピーダンスの理論値は、式(1)で $Q_L = 0$ と置いて、次のように与えられる。

$$\frac{Z_M}{Z_i} = \frac{P_M(s)}{Z_i Q_M(s)} = F_i(z) \coth Z_i F_i(z) T_L \quad (9)$$

(2) 実験結果

位置 B と D を使った入口インピーダンスの測定結果を、横軸に周波数、縦軸にゲイン (対数目盛, dB) と位相角を取り、図 5 に示す。○が差動アンプを使って測定した差圧 Δp と圧力 p_2 のデータから式(3)₁、(5)₁により求めた値、△が圧力 p_1 、 p_2 のデータから式(3)₂、(5)₂により求めた値、実線が式(9)で求めた理論値である。ちなみにこの時入口の位置は、位置 B、D に対応してそれぞれ $x = -1.15\text{m}$ 、 -3.15m となる (図 2)。

次に、位置 B の測定データを使い、二つの周波数を選んでインピーダンスの管路軸方向分布を求め、理論値と比較したものを、横軸に入口からの無次元距離を

Fig.6 Axial distribution of impedance along a pipe with its end closed

として、図 6 に示す。500Hz の場合は、差圧を使って使わなくても、流量が 0 となる閉鎖端のごく近くまで測定値が理論値とよく合っており、修正慣性差圧法が小さい流量の測定にも有効であることを示している。一方 200Hz の場合は、差圧 Δp と圧力 p_2 から求めたインピーダンスは理論値とよく合っているが、差圧を使わずに p_1 、 p_2 から求めた測定値では理論値との間に明らかなずれが見られる。これは意外な結果であるが、修正慣性差圧法においては圧力を AD 変換する前に電

Fig.7 Differences between differential pressures measured by subtraction before and after digitization

Fig.8 Test line with a piston inserted at its mouth for examination of MKDP method

Fig.9 Comparison of flow rate and pressure waveforms measured directly and by MKDP method

氣的な引き算で差圧を求める方が、測定精度の劣化を防ぐ上で有効であることを示している。

電氣的な引き算で差圧を求めるか否かは、測定原理の違いではなく、測定技法上の違いである。同じ測定原理に立ちながらこのようなずれが生じる原因は、以下のように考えられる。

依って立つ原理は同じであるから、差圧 Δp でなく p_1 、 p_2 を使う式(3)_b、(5)_bにおいても、引き算 $p_2 - p_1$ に近い演算が行われる。従って測定技法の違いは、圧力データをアナログのまま電氣的に引き算するか、デジタル化した後に引き算するかの違いと見なせる。差圧 Δp が小さくなると、引き算 $p_2 - p_1$ において p_1 、 p_2 の AD 変換誤差の影響が相対的に大きくなるから、その結果図 6(b)の p_1 、 p_2 を使った測定の精度が劣化したと考えられる。実際、アナログの引き算による測定値 Δp と AD 変換した測定値 p_1 、 p_2 の差 $p_2 - p_1$ がどれほど違うか調べてみると、図 7 の様な結果となり、200Hz 付近で両者が大きく相違し、またその時差圧も小さくなっていることが分かる。

ついでに差圧が小さくなる原因を調べるため、圧力測定孔 B の位置を図 6(b)に記入してみると破線のようになり、200Hz で丁度インピーダンスの極大点、換言すれば定在波の節が 2 つの測定孔の間に来ることが分かる。定在波の節では液柱は動かなくなるので、液柱

の加速度すなわち慣性差圧が小さくなり、その結果 Δp の測定値が小さくなったことが分かる。

4. 2 流量、圧力の測定

(1) 実験装置

次に図 8 のように、末端を閉鎖した測定管の入り口にピストンを挿入し、脈動流をその一端に導いてピストンを加振させ、末端閉鎖管内に脈動を作り出す。ピストンには棒を介して圧電式加速度計(測定周波数 2 ~ 6kHz、共振周波数 32kHz)を繋ぎ、ピストンの振動を測定すると共に、ピストン近くに付けた圧力センサでピストン前面の圧力も直接測定する。

(2) 実験結果

位置 B に二つの圧力計を付け、修正慣性差圧法により測ったピストン前面の流量、圧力の波形と、ピストンに付けた加速度計で測った流量、ピストン前面に置いた圧力計で直接測定した圧力の波形を、幾つかの周波数について比較したものを図 9 に示す。位相や振幅、高調波によるひずみも含めて、両者の波形はよく一致している。

一方、二つの異なる測定法で得られた結果がどこまでよく一致するかをもっと詳しく見るために、流量、圧力それぞれの基本波成分について、両測定値の振幅比と位相差を測定周波数ごとにプロットしたものが図 10 である。結果は概ね、両測定値の一致

Fig.10 Amplitude ratios and phase differences between fundamental harmonics of flow rates and pressures measured directly and those by MKDP method

Fig.11 Comparison of mouth impedances measured either directly or by MKDP method with theoretical ones

Fig.12 Helmholtz resonator and measuring pipe

を示す位相差0, 振幅比1 (0dB) に並んでいるが, 高周波になると振幅比の方は1 (0dB) からずれている. そこでピストン前面のインピーダンスを, Δp と p_2 を使った修正慣性差圧法 (○) 並びにピストンと加速度計 (×) により測定し, 理論値 (実線) と比較してみると図11のようになった. これを見ると, 修正慣性差圧法で求めた結果の方が理論値とよく合っており, 両方の測定方法で得た値の振幅比が高周波数で相違する原因は加速度計にあると思われる. しかしながら圧電式加速度計は半導体圧力計に劣らず動特性がよく, その原因がどのようなものかは分からない.

5. ヘルムホルツ型共鳴器を用いた精度検証

5. 1 測定方法と装置

末端閉鎖管を使ったインピーダンス測定実験によって, 修正慣性差圧法では閉鎖端近くの小振幅流量も測定可能であることが分かったが, 次にこの方法が小振幅圧力の測定に有効か否かを, 低インピーダンス要素であるヘルムホルツ共鳴器を使って調べる.

著者らは以前に, 円筒を組み合わせて作ったヘルムホルツ共鳴器が, 脈動吸収フィルターとして有効であり, その性能が粘性波動理論 (式(1)) で正確に予測できることを明らかにした⁷⁾. ここでも同様の共鳴器を使い, ネックインピーダンスを修正慣性差圧法で測定して, 理論値と比較する.

実験に用いた共鳴器と測定管を図12に示す. 共鳴器は, 末端面を移動可能にして容積を変化できるようにしており, 100mm 離れて2つの圧力測定孔を設け

Fig.13 Neck impedances of Helmholtz resonator measured by MKDP method

た内径16mmの測定管兼ネックをその口に繋ぐ. 図3と同様に脈動発生油圧回路に組み込み, 共鳴器の逆共振点を中心に周波数を変えて測定を行う.

5. 2 測定結果

共鳴器長さ $L_R = 240\text{mm}$ として測ったデータを用い, ネック長さ $l_N = 80\text{mm}$ および 20mm におけるネック入口インピーダンスを求め, 理論計算値と比較して図13に示す. $l_N = 20\text{mm}$ の場合は, 差圧を使わない測定値の方に理論値からのずれが見られる.

同じ実験の差圧 Δp のデータを使い, 幾つかの周波数についてインピーダンスのネック軸方向分布を求め, 理論値と比較すれば図14のようになる. 圧力振幅が小さくなるインピーダンス極小位置あたりでも, 差圧 Δp を使った修正慣性差圧法が妥当な測定結果を与えることが分かる.

6. 修正慣性差圧法の誤差要因

Fig.14 Axial distribution of neck impedances of Helmholtz resonator measured by MKDP method

Fig.15 Addition of complex vectors to find flow rates and pressures in MKDP method

修正慣性差圧法特有の誤差としては、①測定2点圧力の差が小さくなりすぎて生じる誤差、および②測定原理に由来する誤差がある。①は、2点で測定した圧力波形の振幅は十分大きいのに、両者に位相差がほとんどない場合に生じるが、既に明らかにしたように、2点圧力の間の差が僅かであっても、両出力を差動アンプに通し、電気的な引き算をして求めた差圧を使うことで誤差を軽減できる。

一方②は、修正慣性差圧法の測定原理式(3)、(5)に由来するもので、求める点の流量、圧力の振幅と位相が、例えば以下のように複素数ベクトルの和で与えられることに起因する。

$$\begin{aligned} Q_3(j\omega) \\ = GQ_{\Delta p}(j\omega)\Delta P(j\omega) + GQ_{p_2}(j\omega)P_2(j\omega) \end{aligned} \quad (3)'$$

この式を模式的に描いた図15からも明らかなように、二つの複素ベクトル $GQ_{\Delta p}(j\omega)\Delta P(j\omega)$ および $GQ_{p_2}(j\omega)P_2(j\omega)$ の絶対値の大きさが同程度でかつ両者のなす角が180度に近づけば、ベクトルの和である $Q_3(j\omega)$ はもとの二つのベクトルに比べて小さくなり、その結果 $Q_3(j\omega)$ の測定誤差は振幅、位相ともに大きくなる。

測定値ごとに図15のような図を描くことは実用上面倒であるから、それに代わるものとして容易に計算できる以下の数値パラメータを提案する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{GQ} &= \left| \frac{GQ_{p_2}(j\omega)P_2(j\omega)}{Q_3(j\omega)} \right| \\ &= \left| \frac{GQ_{p_2}(j\omega)P_2(j\omega)}{GQ_{\Delta p}(j\omega)\Delta P(j\omega) + GQ_{p_2}(j\omega)P_2(j\omega)} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

式(5)_h、(3)_h、(5)_hについても同様なパラメータ ε_{GP} 、 ε_{HQ} 、 ε_{HP} を定義でき、例えばパラメータ ε_{GQ} が極端に大きくなると $Q_3(j\omega)$ の精度が劣化していると判断できる。

一例として、図14のヘルムホルツ共鳴器ネックの軸方向インピーダンス分布測定結果について ε_{GQ} 、 ε_{GP} を評価してみると、図16のようになる。インピーダンスが極小値をとる位置付近で、 ε_{GQ} は0.1以下であり流量は十分な精度で測られているが、 ε_{GP} は大きくなり、圧力の測定精度が低下する可能性が浮かび上がる。

7. 結 言

修正した慣性差圧法は、油圧脈動管路における流量・差圧・インピーダンスを個別または同時に測定したい場合に有効である。

Fig.16 Estimation of errors based on measuring principle of MKDP method

測定誤差を減らすためには、①測定圧力をディジタルサンプリングする前にアナログのまま引き算して求めた差圧を使う、②圧力を測る2点を、定在波の節がその間に来ない位置に設ける といった方法が有効である。

また測定原理に由来する誤差は式(10)のような数値パラメータで評価でき、それを調べることで大きな誤差を回避する事も可能となる。

参 考 文 献

- (1) 鷲尾誠一, 高橋智, 山口智史, 液柱分離における過渡変動流量の測定, 機論, 60-574, B(1994), 2081-2088.
- (2) 鷲尾誠一, 山口智史, 高橋智, ギャポンプ吐出量脈動の測定, 機論, 59-565, B(1993), 2855-2862.
- (3) 鷲尾誠一, 蓮中浩二, 秋山元紀, 三方ボール弁を用いたPWM油圧制御系の作動特性, 機論, 61-585, B(1995), 1736-1743.
- (4) 鷲尾誠一, 中村善也, 于永光, 油圧流量制御弁の特性評価モデル, 機論, 67-658, C(2001), 1832-1839.
- (5) 中村善也, 鷲尾誠一, 庄司野公也, 油圧ボール弁特性の測定とモデル化, 機論, 68-668, C(2002), 1149-1156.
- (6) 岡村健二郎, 小西忠孝, 鷲尾誠一, 油圧管路における波動現象の研究(第1報, 波動方程式の比較検討), 機論, 38-314, (1972), 2612-2620.
- (7) 鷲尾誠一, 高橋智, 向畑和男, 山口智史, ヘルムホルツ共鳴器型油圧脈動フィルタの研究, 油圧と空気圧, 24-6, (1993), 729-735.