

管内空気柱の音響周波数変化を利用した変位の精密測定* (スピーカと電気的フィードバックループによる共鳴法)

坂本 秀一*¹, 一宮 亮一*², 鈴木 祐治*³

A New Measuring Method of Displacement by Means of Variations of Sound Frequency and the Length of Air Column in a Small Pipe (A Resonant Method by Using Speaker and Electric Feedback Loop)

Syuichi SAKAMOTO, Ryoichi ICHIMIYA and Yuji SUZUKI

A new measuring method of displacement by means of variations of sound frequency and length of air column in a closed resonant pipe has been investigated. In this paper, a speaker is used as a sound generating source in stead of air jet for the feedback excitation mechanism on the edge instrument. This paper deals with a new kind of displacement sensor using a electric feedback circuit. A sweep signal is radiated from the speaker through the small hole at one end of the closed resonant pipe toward inside of the air column. The sound pressure takes the largest value at the resonant frequency. The displacement of the plunger which is inserted from other end of the pipe, corresponds to the length of the air column. So, the displacement of the plunger makes good correspondence to the resonant frequency of the air column. The phase locked loop devise is adopted for stability of the resonation and frequency.

Key Words: Measurement, Sensor, Sound, Displacement, Frequency, Speaker, Microphone, Feedback, Phase Locked Loop

1. 緒 言

超精密加工の発展につれて、工作機械や加工物の精度は年ごとに急速に高くなっているため高精度、安価かつ簡単な測定方法が生産現場から要求されている。

本研究は、物体の変位をパイプに発生する音響の周波数に対応させて、変位を精密に測定する新しいセンサを開発し、実用化することを目的としている。

先に報告した変位測定用のセンサ⁽¹⁾⁽²⁾は以下のようなものである。小さなパイプの一端からプランジャを差し込み一端閉口管とする。このとき開口端に圧縮空気を吹き付けて音響を発生させる。プランジャの変位はパイプ内空気柱長さの変化に対応する。共鳴周波数は空気柱の長さによるため、プランジャの他端を測定物に接触させておけば、音響周波数の測定により変位測定が可能となる。この変位センサの発振機構はエアリード楽器等に見られるフィードバック発振機構と同一のものであった。

本報で報告する変位センサは、被測定物の変位を空

気柱の共鳴周波数に対応させるという従来のアイデアをさらに生かし、従来の空気源に代わりスピーカを音源とし、マイク、PLL(位相同期ループ)デバイス等を用いて、電子回路によりフィードバックループを構成し発振させるものである。この方法によると、接触子の変位に対し発振周波数が忠実に追従し、約1 μ mの精度で変位測定が可能である。

2. 測定法の原理

図1に示すような両端を閉じたパイプの一端に設けた小孔から適当な音波を入れると、管内の音圧にはある周波数でピークが現れる。管内の音圧は端面付近に

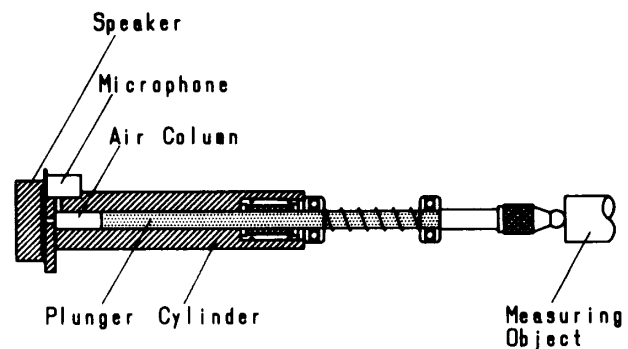


図1 変位センサの詳細図

* 原稿受付 平成元年10月25日。

¹ 正員, 新潟大学大学院 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

² 正員, 新潟大学工学部。

³ 学生員, 新潟大学大学院。

開けられた小孔からマイクロホンによりピックアップされる。この空気柱の長さは、管の他端から差し込まれたプランジャが動くことにより変化する。したがって、空気柱の共振周波数は測定子の変位に対応する。

図2はセンサ内部の音響系の拡大図である。スピーカからの音圧は管端面の小孔①②から空気柱②③に放射される。小孔の存在により、③は厳密には閉端とはならないが、空気柱②③の内径3mmに対して、小孔①②の内径は1mmであり、空気柱内部から見た端面③を音響的に明確にするため小さくしてある。そのため、音響系全体の共振周波数は、②③の部分の長さ l を両端閉口管として計算したときの共鳴周波数におおむね等しくなる。両端閉口の空気柱の共振周波数は式(1)で示される。なお本実験においては一次モードを用いた。

$$f = nc/2l \dots\dots\dots(1)$$

- f : 共振周波数
- n : 倍音次数 ($n: 1, 2, 3, \dots$)
- c : 音速
- l : 空気柱長さ

共振子としての空気柱②③に対して、小孔①②、および④⑤は音響を入出力するための結合子となる。小孔が音波の波長に対して長すぎるとLPF(低域濾波器)の働きをしてしまうため、その長さは波長の1/4以下となるように設計されている。また、これらの小孔が短すぎると音響系全体の共振周波数は高くなり、空気柱②③の共振点から離れていくことにより発振は不安定になる。そのため、これらの長さは慎重に定める必要がある。

本装置のスピーカは、簡単に入手できる音源としてHiFiイヤホンを用いた。マイクも市販の安価なコンデンサマイクロホンを用いた。両者の周波数特性をそれぞれ図3および図4に示す。

さて、センサの電気音響系の周波数特性を調べるため、図5に示すような構成で伝達関数を測定した。関数発生器による正弦波スイープ信号をスピーカからセンサ内に放射し、それに同期した信号と、マイクが拾った信号とをFFTプロセッサに入力してフーリエ解

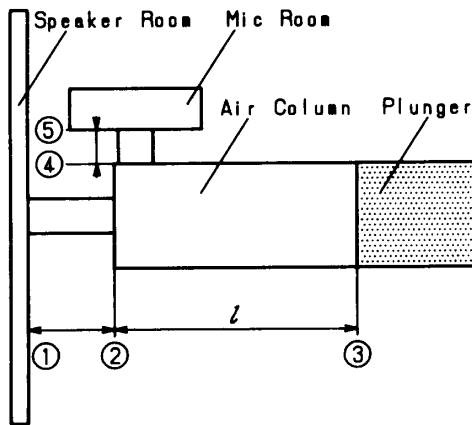


図2 センサ内部の音響系

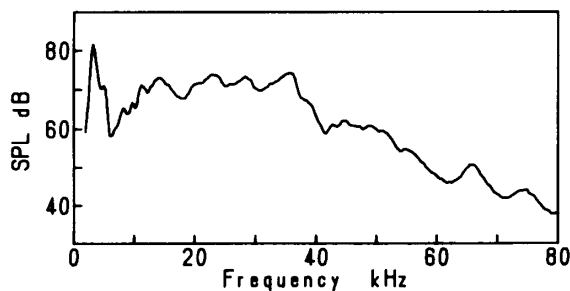


図3 スピーカの周波数特性

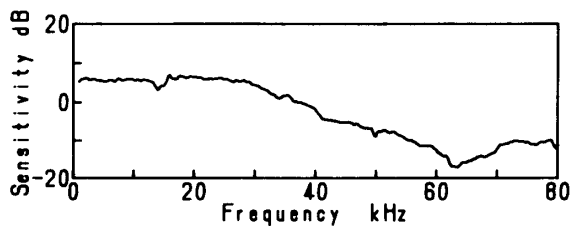


図4 マイクの周波数特性

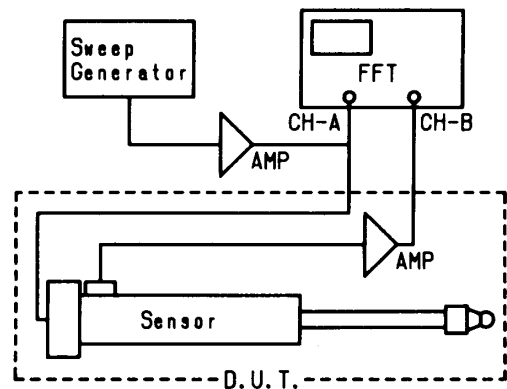


図5 センサの伝達関数測定時のブロック図

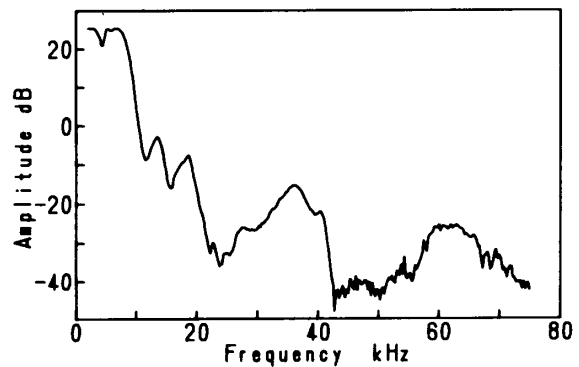


図6 センサの伝達関数測定結果(無共振時)

析を行った。まず、センサにおける空気柱②③の共振分を除いた周波数特性を調べるため、プランジャを抜き取り、代わりに吸音材(フェルト)で閉止したときの伝達関数測定結果を図6に示す。低周波域でのゲインが大きくなっているためセンサを作動させる際にはマイクのプリアンプ後段にHPF(高域濾波器)を挿入してある。

図7(a)~(c)はセンサにプランジャを差し込んでそれぞれ $l=6, 7, 8$ mmとしたときの伝達関数測定結果である。共振分のみを観察するため、図6の特性分をイコライズしてある。図中の破線は式(1)による共鳴周波数を示す。共振ピークは破線の位置とよく一致している。このように共振ピークは空気柱長さに追従して変化する。このことを原理として、変位測定が可

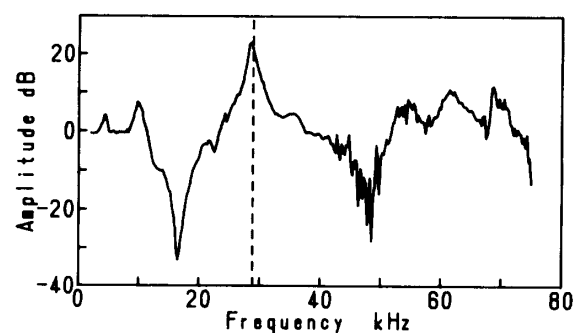
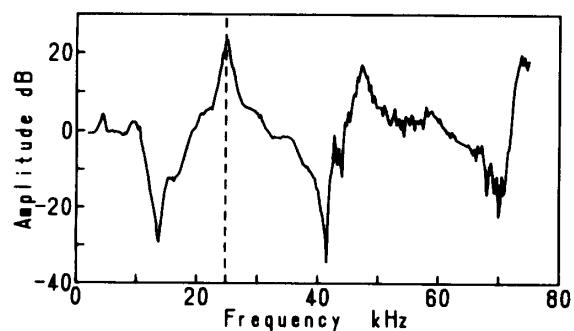
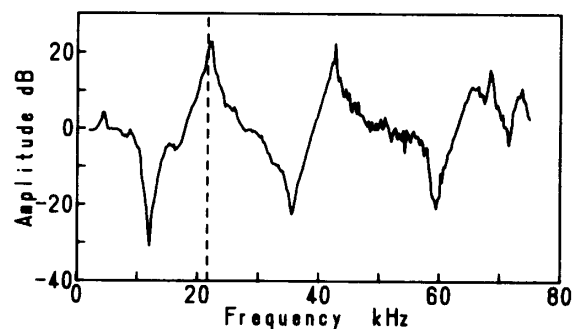
(a) $l=6$ mm のとき(b) $l=7$ mm のとき(c) $l=8$ mm のとき

図7 センサの伝達関数測定結果

能となる。

3. 本装置の動作

先の原理を利用した変位センサを可能とするには、リアルタイムで共振周波数を知る必要がある。そこで、発振器によるスイープ信号をスピーカから管内に放射し、マイクが拾った音圧が最大になる周波数に収束させる方法を考案した。このときすばやく共振点に収束させることができればリアルタイムで変位測定が可能となる。このようなフィードバックプロセスを行うため、本装置においては安価で入手しやすく、応答性及安定度についても良好な特性が得られるPLLデバイスを用いた。

実験に用いた装置の構成を図8に示す。電源投入瞬間のVCO(電圧制御発振器)は設定範囲の下限である自走周波数を出力し、その周波数の音波がスピーカから管内に放射される。管内の音圧はマイクによりピックアップされ、PC(位相比較器)に入力される。こうしてPLLはロックする。VCOの周波数は電気音響系を經由して再びPCに入力されるため、PLLはロックした状態で設定周波数範囲を自由に動けることになる。PLLの動作周波数の両端付近ではフィルタによりマイクのゲインがカットされているので、PC入力電圧が比較的低く不安定なためPLLの周波数は設定範囲の中央部へと移動する。そしてPC入力電圧がより大きくなる周波数へと動く。結果として共振点以外ではPLLの周波数は設定範囲をスイープしていく。そして最終的に最も大きなPC入力が見られる周波数、すなわち共振点に収束する。このようなPLLの性質により、高価な関数発生器や特別なフィードバックアルゴリズムを必要とせずに十分な性能を得ることができた。実際にこの動作は極めて短時間に完了するので、発振周波数は電源投入とほとんど同時に収束すると考

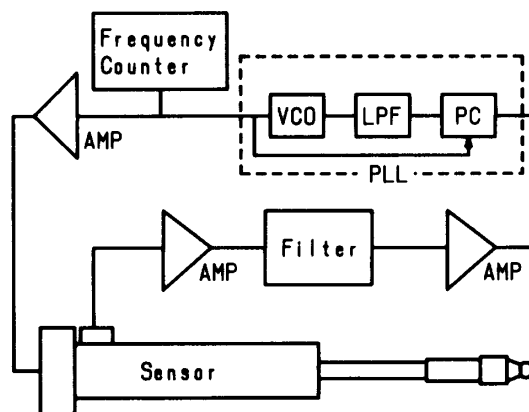


図8 装置の構成

えてよい。いったん PLL が収束すると、その後の発振周波数はプランジャの動きに対してリアルタイムで追従する。

スピーカへの VCO 出力は入力周波数と同じ矩形波となるため奇数次倍音を除けばひずみやノイズをほとんど含まないものとなる。センサ作動時の管内音圧をマイクでピックアップしたスペクトルを図 9 に示す。発振周波数におけるピークスペクトルは非常に尖鋭となり、周波数も安定している。なお矩形波であるため、奇数次の倍音成分はかなり大きく出るが、1 倍音と 3 倍音では隔たりがあるため誤動作はなかった。しかし、このような音響系の高次の共振周波数は正確に基準モードの倍数とならない。したがって、PLL の高調波周波数と音響系の高次共振周波数との不一致による周波数安定度の低下を防ぐため、PLL 後段に LPF を挿入すればより望ましい。

4. 実験方法および結果

4.1 実験方法 管端から差し込まれたプランジャの変位は、被測定物として設けた精密マイクロメータヘッドにより正確に知ることができる。このようにして管内空気柱の長さ l と発振周波数の関係は正確に測定される。

一般に、本装置が測定器としてあるいは制御装置の

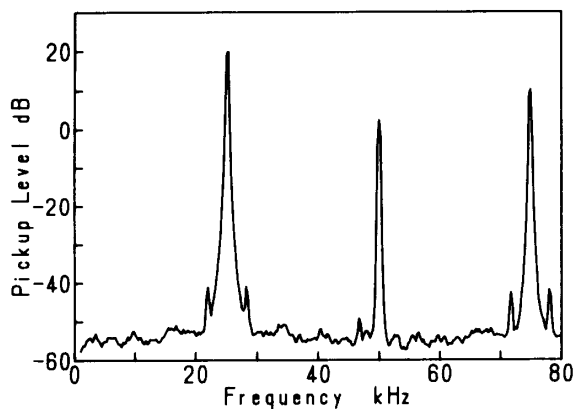


図 9 管内音圧スペクトル

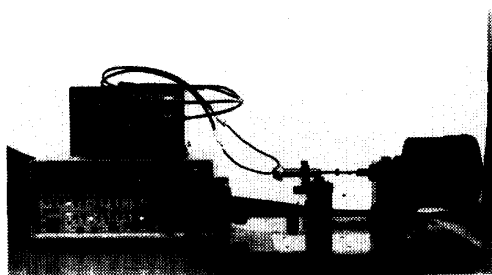


図 10 装置の外観

一部として使用される環境は 0.5~10 kHz の騒音レベルが高い場合が多い。本センサは音響系がほぼ閉じているため暗騒音の影響は受けにくく、外部への音響の放射も少ないが、周波数分解能を上げるためもあって使用する周波数は 20 kHz 以上とした。

使用したパイプの材質は真ちゅうであり、内面は精密に仕上げ加工した。プランジャは円筒研削を施したシャフト、接触子には超硬チップを用いた。また、パイプの端部にはスライドボールベアリングを挿入した。測定圧は約 30 g となっている。

装置の外観を図 10 に示す。応答時間は写真の周波数カウンタを用いた場合、0.1 Hz の分解能を得るのにレシプロカル方式で 100 ms となる。発振周波数が安定するまでの時間は、PLL の周波数安定度と収束時間のバランスを決定する LPF の選択によるが、50 ms 程度が適当と思われる。なお、VCO 出力は矩形波であるため、正弦波と比較して周波数カウンタによる測定には有利であり、同じゲート時間、分解能においても周波数の測定精度は高い。

4.2 実験結果および考察 図 11 の実線は、空気柱長さ l を変化させ、それに追従する発振周波数との関係を示したものである。この場合、1 μm を読み取るのに必要な周波数分解能は約 2 Hz となる。参考のため式(1)の両端閉口管の共鳴周波数を破線で示す。

図 11 の共鳴周波数の計算値と実験値との間には隔たりがある。この差異の原因としてはいくつか考えられる。

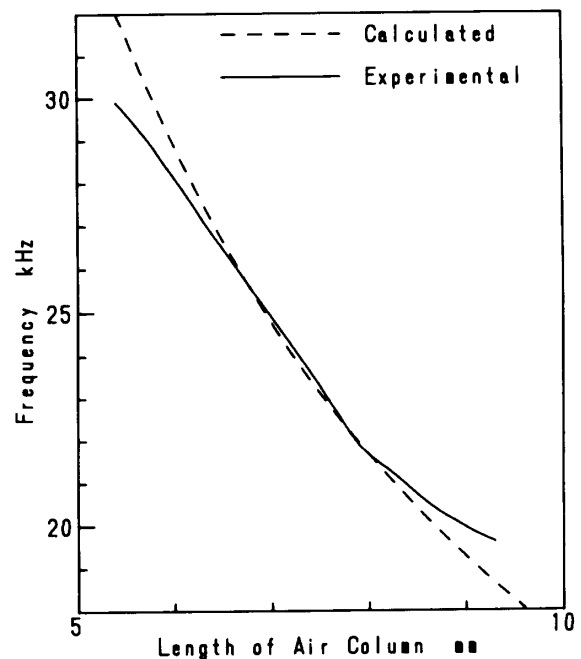


図 11 空気柱長さ l と発振周波数の関係

(1) 実際の共振点はスピーカから管内に音波を放射する小孔(図2①)から管内部を見た音響系全体の入力インピーダンスが最小になる点である。これと空気柱②③の純然たる共振点との間には差異がある。

(2) マイクの拾音音圧の大小にはシステム全体の周波数特性がある程度影響してくる。したがって、実際に得られる変位と周波数の関係は、使用するスピーカ、マイクの周波数特性によって若干シフトする。

(3) 実線の両端では曲線が逆S字形に反り返っているが、これは帯域制限用のフィルタの影響により周波数特性の裾野が切られるためである。

これらの問題は、平坦な周波数特性を持つスピーカ、マイクの採用やデジタル信号処理の応用により比較的容易に解決されよう。

なお、装置の消費電力は微小であるため使用する電源はAC 100 Vに限らず乾電池などでも動作が可能である。したがって、電池で動作が可能な周波数カウンタを接続するなり、組込むなりすれば可搬性に富み、電源の制約を受けないシステムとなる。

5. 結 言

両端を閉じたパイプの一端に設けた小孔から音波を入れ、端面付近に開けられた小孔からマイクロホンにより音波をピックアップしフィードバックすることにより共振周波数において強力に発振させる。このとき、

プランジャを動かし空気柱長さを変化させると被測定物の変位に対して発振周波数が追従することになる。この現象を利用した新しい変位測定法を考案し、装置を試作し、実験を行った結果、次の結論を得た。

(1) パイプ内での発振周波数は、共鳴周波数の計算値にほぼ準じており、空気柱長さの減少に従って増加し、両者の間によい対応を示している。

(2) このセンサは比較的測定範囲が広く、高精度測定も可能であり、接触式でありながらセンサ内部の構成部品が皆無であるという特徴を持つ。

(3) 本装置は電池で動作するため、電源の制約を受けない。また、装置全体がコンパクトなため可搬性に富んでいる。

(4) 変位の測定法として、本方法は装置が簡単で、安価であり、工場などの暗騒音の大きい場所においても使用できる。

本研究を進めるにあたり、装置の製作、実験などでお世話になった斎藤重昭氏、松本孝幸氏に心からお礼申し上げる。

なお、本論文は文部省科学研究費補助金による研究成果の一部を取りまとめたものである。

文 献

- (1) 一宮・坂本, 機論, 54-499, C(1988), 651.
- (2) 坂本・一宮, 機論, 56-522, C(1990), 435.