

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*
(動的端補正と位相進角の関係)— 宮 亮 —*¹, 坂 本 秀 —*²A New Measuring Method of Displacement and Position by Means of
Variations of Sound Frequency and Air Column in a Small Pipe
(Relationship between Active End Correction and Transit Angle)

Ryoichi ICHIMIYA and Syuichi SAKAMOTO

This paper deals with the development and analysis of a new measuring method of displacement and position by means of the variations of the sound frequency and the air column in a resonant pipe. Sound generates when compressed air is blown onto an open-ended face of a small pipe. The sound frequency varies with the length of the air column in the resonant pipe. By applying this phenomena, a new, accurate and simple measuring method for the displacement and position is examined and developed. The displacement corresponds to the length of the air column and the variation of the sound frequency shows a good relationship with the displacement. The resonant frequency of the pipe can be shown by a simple equation; however, the resonant frequency does not coincide with the sounding frequency of the pipe. The difference of these two frequencies could be introduced in this paper as an active end correction of the pipe.

Key Words: Accurate Measurement, Displacement, Sound Frequency, Sound Generation, Resonant Pipe, Air Jet, Active End Correction, Transit Angle

1. ま え が き

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。工作機械や加工物の変位を精密に測定するためには種々の測定方法が採用されているが、それぞれ特徴を有しており、その特徴を生かして使用されている。精度が高く、安価で簡単な測定方法が生産現場では要求されている。

一端閉口パイプの開口端に圧縮空気を吹き付けると音響が発生する。そのときパイプ長さを変化させると発生している音響の周波数および音圧レベルは変化する。この現象に着目し、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。

先に発表した変位測定用のセンサ⁽¹⁾⁽²⁾は両端開口パイプの一端に圧縮空気を吹き付け、他端近傍に置いた物体が変位すると、発生している音響の周波数が変化する現象を応用したものであり、非接触式で精度は高いが、測定範囲が狭いという欠点があった。そこで、接

触式ではあるが、比較的精度も高く測定範囲の広いセンサを考案した。この方法によると、物体の変位と発生音の周波数がよい対応を示し、1 μ m前後の精度で測定が可能である。またパイプの寸法その他の条件を適当に選ぶことにより、発生音の周波数を選ぶことができるので、使用する場所の暗騒音の周波数を避けることによって、音響の発生している場所においても使用可能である。

本報では、このように新しいアイデアのもとに変位測定方法を考案し、実験装置を用いて変位測定の実験を行って、パイプ長さとは発生する周波数との関係を明らかにした結果について報告する。

2. 音響による変位測定の実験

パイプの一端に空気を吹き付けると音が発生するという現象は、エアリード楽器(フルート、ピッコロ、オルガンパイプ、尺八など)の発振機構として知られている。これらの楽器ではパイプ寸法や吹き付ける空気の圧力などを変化させて周波数を変化させている。

この変位測定法は、図1に示すように、ノズル①を通して圧縮空気を固定したパイプ②の一端に吹き付け、物体④が変位すると、パイプの他端から差し込まれたプランジャ③が変位することにより、パイプ長さ

* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演、原稿受付 昭62年2月25日。

¹ 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

² 学生員、新潟大学大学院。

が変化し、共鳴周波数が変化するという原理を利用している。このときの共鳴周波数は、一端閉口パイプの共鳴周波数に準ずるため、共鳴周波数の計算式は、非接触式のもの⁽¹⁾⁽²⁾と異なり、明快であることがわかる。この変位と周波数変化との関係を利用して高精度に変位を測定するものである。

3. 実験方法および結果

3.1 実験方法 コンプレッサから送られてきた圧縮空気をフィルタに通しレギュレータにより定められた一定圧力に調節し、固定したパイプ端面にノズルからジェット状の空気を吹き付ける。パイプの他端から差し込まれたプランジャは、スプリングによりマイクロメータヘッドに押し付けられ、マイクロメータヘッドの移動により変位を正確に知ることができる。パイプに発生する音はパイプ端面近くに設定したコンデンサマイクロホンに入り、精密騒音計を通してFFTスペクトラムアナライザで周波数を測定し、計算機に送られマイクロメータによる変位量との関係がプリンタに作図される。マイクロホンは圧縮空気が音響測定へ影響を及ぼすのを避けるため、図1におけるパイプ端面の中心から紙面に垂直方向に20 mmの位置に設置されている。空気ジェットとパイプ端面とのなす角度は、ノズルを固定したノズルベースを回転させることにより広範囲に設定することができる。なお、ノズル、パイプおよびマイクロメータヘッドの中心線は、いずれも同一平面上に設置されている。また、実験は温度変化の影響をなくするため恒温室において行った。

一般に、本装置が測定器としてあるいは制御装置の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。この暗騒音の影響を避けるため、パイプに発生する音響は主に10 kHz以上の周波数を採用することにした。使用したパイプの材質は真

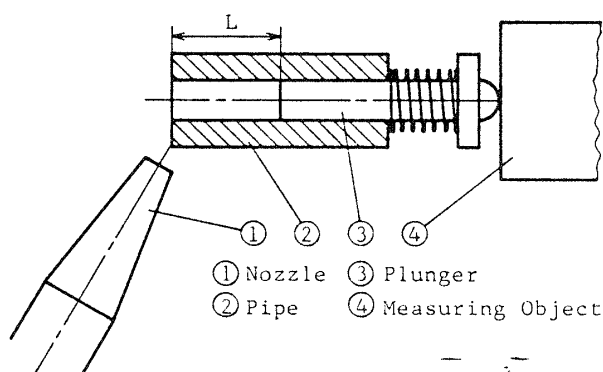
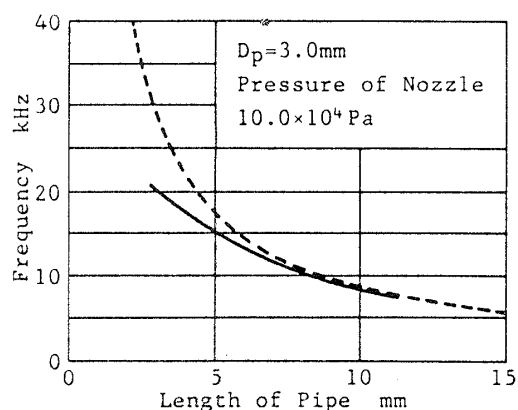


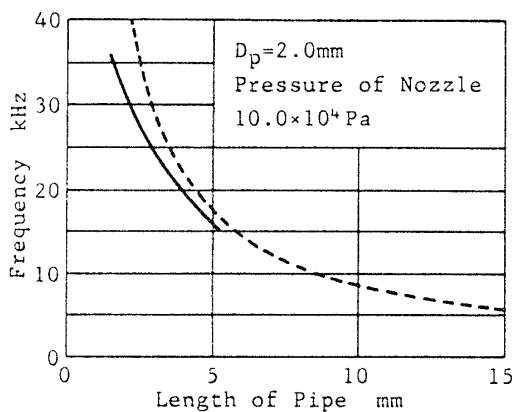
図1 音響による変位測定機構

ちゅう、外径は6 mmである。なお、パイプの端面と内面は精密に仕上げ加工した。

3.2 実験結果および考察 実験装置を使用して、パイプ内径、ノズル内圧力（大気圧との差圧）、空気ジェットとパイプ端面との位置などを種々変化させて、音響周波数と変位との関係を調べた。なお、実験はすべて一倍音で行った。図2(a)の実線は、内径3 mmのパイプにおいてプランジャを変位させることにより、パイプ長さ L を変化させて、それとともなって変化する発音周波数 f_s との関係を示したものである。パイプ長さ L が減少するに従って発音周波数 f_s が明らかに上昇しており、両者の間に良好な対応を示していることがわかる。破線は一端閉口パイプの共鳴周波数 f を計算した結果である。図2(b)は内径2 mmのパイプにおいて、パイプ長さ L と発音周波数 f_s の関係を測定した結果である。図2(a)に示した場合と同様、パイプ長さ L が減少するに従って発音周波数 f_s も上昇していることがわかる。しかし、図2(a)と比較して、発振の得られるパイプ長さ L の範囲は短いほう



(a) パイプ内径が3 mmの場合



(b) パイプ内径が2 mmの場合

図2 パイプ長さの変化による発生音の周波数変化

に移動しており、それとともに発音周波数 f_s の範囲も上昇している。発振の得られるパイプ長さの範囲は、パイプ内径をはじめとして、ノズル内圧力、空気ジェットとパイプ端面との位置関係などによって大きな影響を受けることが実験によって明らかになった。図2(a)に示した場合では測定精度は約 $3\mu\text{m}$ 程度であるが測定範囲は約 10mm とすることが可能であり、図2(b)に示した場合は測定範囲は約 3.5mm にとどまるが、測定精度は約 $1\mu\text{m}$ となる。なお、FFTアナライザの周波数分解能は約 2Hz に設定してある。このように、諸条件を変化させて、発振が得られるパイプ長さの範囲を選択することにより、測定範囲の広さと、測定精度の高さを適当なかねあいで選択することが可能である。

4. 動的な端補正と位相進角の関係

一端閉口パイプの共鳴周波数 f は次式で表される。

$$f = NC/4L \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 N : 倍音次数 ($N=1, 3, 5, \dots$)

C : 音速

L : パイプ長さ

図2(a)および図2(b)からも明らかなように、測定された発音周波数 f_s は式(1)から計算した共鳴周波数 f からずれている。このため一般にはパイプ端面における補正でこれに対処している。このパイプ-マウス端補正は、パイプおよびマウスの幾何形状により求める実験式は報告されているが⁽³⁾、 f_s の f からのずれは、マウス上のジェットの速度にも依存し、いわゆる「アクティブな端補正」⁽³⁾が必要となるため、一般に式で表すことは難しい。

端補正が必要になる原因は、本質的にジェットの存

在による f_s の f からのずれに起因するため、ここでは、 $\Delta f = f - f_s$ のジェット速度への依存性を調べた。まず、第1のアプローチとして、マウス上のジェットの走行時間 τ_e を求めて Δf の値との関係を調べた。ジェットの流速の測定には熱線風速計を使用した。校正は $30 \sim 300\text{m/s}$ の範囲で行った。なお、マッハ数が大きいため、空気の圧縮性を考慮してある。図3はパイプにおけるマウス面を示す。ジェット速度や、ジェット膜の厚さは、ジェットの中心線と重なる \overline{BD} 上が最も大きい。したがって、ここでは直径 \overline{BD} 近傍において主な発振が起こっていると考え、図3における影の部分における流速の測定結果を用いることにした。したがってマウスにおけるリップ-エッジ間距離 d は、パイプ内径 D_p と等しくなる。また、熱線フィラメントの x 方向の位置は、どの x の位置についてもマウス面上から $75\mu\text{m}$ の位置で流速 U がほぼ最大の値を示す、という理由からこの位置において測定した。測定にあたっては、ノズル内圧力やパイプ長さ L を段階的に変化させ、熱線フィラメントをリップ-エッジ間 ($x=0 \sim d$) で $d/10$ おきに動かして流速分布を測定した。測定結果の一例として、 $D_p=2.5\text{mm}$ のパイプにおいての、 $L=5\text{mm}$ のときの各ノズル内圧力についての結果を、マウス前後の壁面部分のものもあわせて図4に示す。壁面上ではジェットの減速はわずかだが、マウス上では急激に減速しているのがわかる。リップ-エッジ間の走行時間 τ_e は測定された流速をもとに、次の幾何平均によって近似される。

$$\begin{aligned} \tau_e &= \int_0^d dx/U(x) \\ &\approx \sum_{i=1}^n (1/2)(1/U_{i-1} + 1/U_i) \Delta x \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $n\Delta x = d$ であり、 U_i はリップから $i\Delta x\text{mm}$

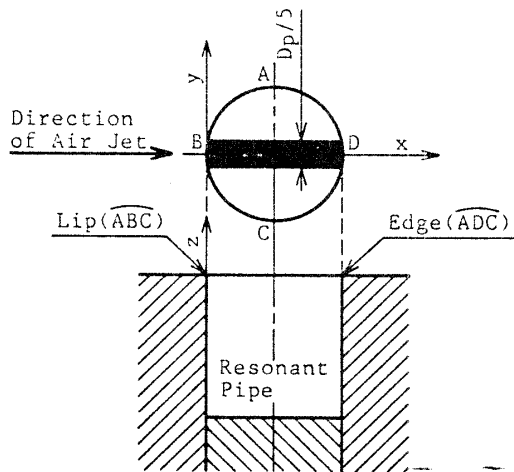


図3 マウス面上の流速測定に用いた領域

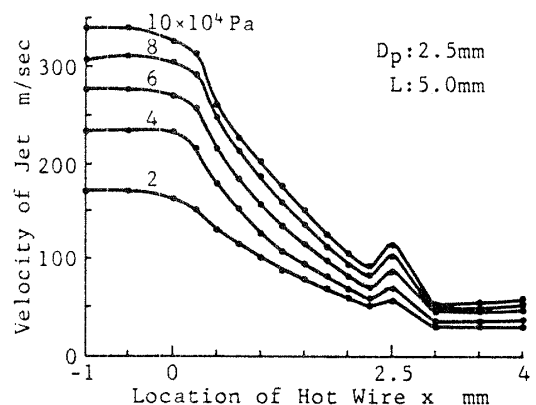


図4 マウス面上の平均速度分布

($i=1, 2, \dots, n$)の距離におけるジェットの流れである。図5は、これらの結果をもとに、横軸に τ_e を、縦軸には f と f_s との差 Δf をとったものである。3~11 mmまでの種々のパイプ長さ L に対してノズル内圧力を変化させた場合を考えると、 τ_e の増加にともなって Δf は直線的に増加する傾向がみられ、これらの点は直線で結ぶことができる。各点を結ぶ曲線は、ノズル内圧力の等圧線である。ノズル内圧力を一定にしているにもかかわらず、パイプ長さ L の変化に従って τ_e が20%前後も変化しているのは興味深いことである。 $L=10$ および11 mmの測定点は各2点ずつしかないが、参考のため直線で結んだ。

さて、マウス上をながれるジェットは発振音にさらされるので式(2)で表される τ_e は発振周波数 f_s を含めることによってリップ-エッジ間位相進角 θ_e に変換され式(3)で表される。

$$\theta_e = 2\pi f_s \tau_e \dots\dots\dots (3)$$

図6は図5の横軸を位相進角 θ_e とし、あわせて縦軸を $\Delta f^* \equiv \Delta f / f$ として、両軸の無次元化をはかったものである。図6からわかるように、 $L=6\sim 7$ mmの

ときが θ_e で表される発振領域がいちばん広く、 $0.35\pi \sim 0.7\pi$ 付近までである。グラフが複雑になるため、ノズル内圧力の等圧線は省略してあるが、ノズル内圧力が一定のときは、いずれの圧力でも発音の起こるパイプ長さ L の範囲が違うにもかかわらず、 θ_e で表される発振領域は、 $0.3\pi \sim 0.7\pi$ までとなっている。また、パイプ長さ L が小さいほど直線の傾きは大きくなり、 L が小さいほど θ_e の変化が Δf^* におよぼす影響が大きいことを示している。そして、この傾きの値はパイプ長さ L にほぼ反比例している。さらに、これらの直線を延長した交点の大半は $\Delta f^* = 0.05$ 、 $\theta_e = 0.2\pi$ の近傍に集中する。このため、これらの直線の共通の原点が、この付近にあると仮定する。仮想した原点の縦座標を ϵ とおく。このとき縦軸を $\Delta f^* - \epsilon$ に補正し、無次元数としてパイプの長さとお径の比 $L^* \equiv L/D_p$ との積をとったものが図7(a)である。また、図7(b)は同様にして $D_p = 2$ mmのパイプによって得た結果である。図7(a)および図7(b)において実験値はそれぞれ1本の直線の近傍に集まり、二つのグラ

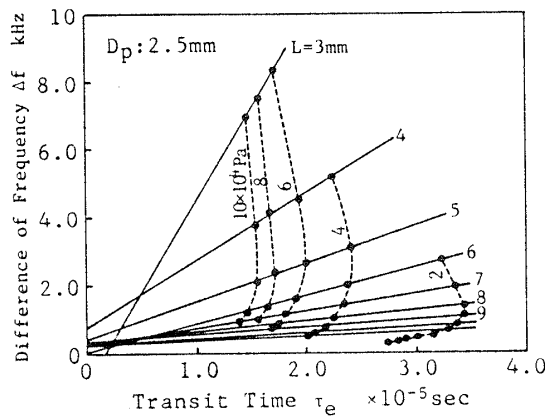


図5 横断時間 τ_e と理論周波数からのずれ Δf

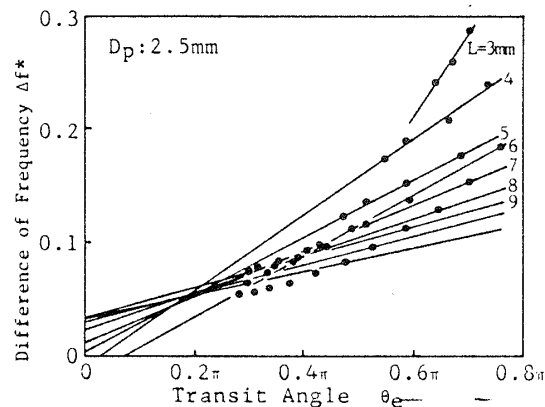
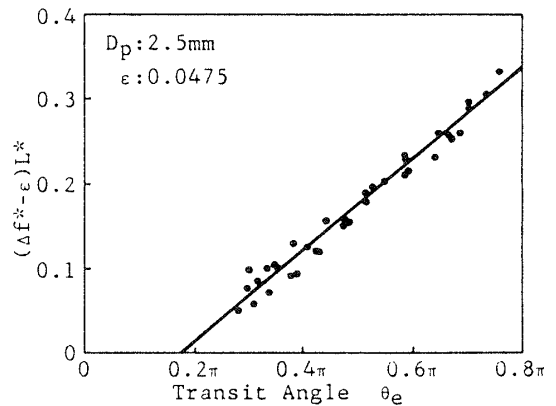
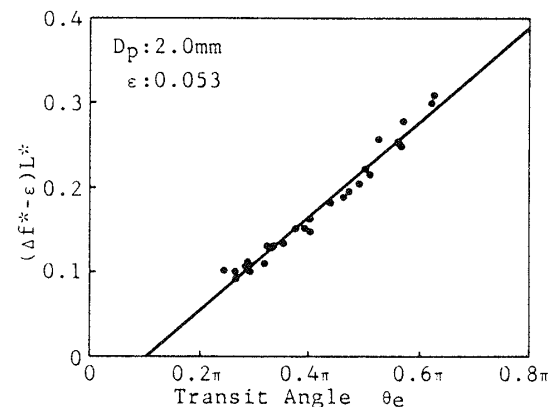


図6 位相進角 θ_e と理論周波数からのずれ Δf^*



(a) パイプ内径が2.5 mmの場合



(b) パイプ内径が2 mmの場合

図7 位相進角 θ_e と $(\Delta f^* - \epsilon)L^*$

フは非常に似た傾向を示す。これにより、 θ_0 の増加に従って $(\Delta f^* - \epsilon)L^*$ は直線的に増加すると思われる。また、 ϵ はパイプやマウスの幾何学で決まる定数と思われる。

このような過程を経て、 Δf^* は定性的には位相進角 θ_0 およびパイプの長さとお径の比 L^* を主なパラメータとして変化することが明らかになった。(ただし、ここでは $D_p = d$ となっている)ここで扱ったジェットはマッハ数が大きいいため、一般のエアリード楽器などが同様な性質を持つかには疑問を残している。

5. おわりに

小さいパイプの一端面からプランジャを差し込み一端閉口としたものの他端面に圧縮空気を吹き付け、音響を発生させたとき、プランジャを移動(変位)させると音響の周波数が変化することを利用した新しい変位測定法を考案し、実験を行って、パイプ-マウス端補正について解析した結果次の結論を得た。

(1) パイプ開口端に圧縮空気を吹き付けたときに発生する音響の周波数は、パイプ長さの減少に従って、増加し、両者の間により対応を示している。

(2) 空気ジェット速度、パイプ端面と空気ジェットの幾何学的関係、パイプ内径などが、位相進角に影

響を与え、発振可能となるパイプ長さ(変位)の範囲を制限している。

(3) この方法では音響の周波数変化を利用する非接触式測定法⁽¹⁾⁽²⁾に比べて比較的測定範囲が広く、高精度測定も可能である。

(4) エアリードを持つ一端閉口パイプのパイプ-マウス端補正において、動的な端補正が必要となる原因であるジェットの存在により起こる周波数のずれの性質が、ジェット位相進角との関係を用いて明らかになった。

(5) 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ため、広く実用に供し得ることが明らかになった。

本研究を進めるに当たり、熱線プローブ、実験装置の製作などにおいて、ご援助を賜りました本学技官、高野 剛氏、松平 雄策氏に心からお礼申し上げます。

文 献

- (1) 一宮・宮下・後藤, 機論, 51-471, C(昭60), 3077
- (2) 一宮・宮下, 機論, 53-485, C(昭62), 125.
- (3) Elder, S. A., *J. Acoust. Soc. Am.*, 41-6(1967), 1609.