管内に発生する音響の周波数利用による変位の精密測定* (発音条件がパイプの発音周波数変化に及ぼす影響の実験による解析)

宮 下 晃 —*¹, 一 宮 亮 —*²

Accurate Measurement of Displacement by Means of Sound Frequency in a Resonant Pipe (Experimental Analysis on Effects of Sounding Conditions to Sound Frequency Variation)

Koichi MIYASHITA and Ryoichi ICHIMIYA

A new accurate measurement of displacement by means of sound frequency variation in a resonant pipe has been investigated. This paper deals with the experimental analysis of the characteristics of the sound frequency variation which is generated in the pipe. In the experiments, the effects to sound frequency variation were examined by changing some sounding conditions. Then, it was made clear that a low sounding mode, short length of the pipe and small inner diameter introduce good results for the measurement of the displacement. By adopting such good conditions, the displacement smaller than 0.1 μm can be measured under non-contact conditions with the object.

Key Words: Sound Generation, Sound Frequency Analysis, Resonant Pipe, Accurate Measurement

1. は じ め に

加工の高精度化を実現することは工作機械に課せられた大きな課題である。このため近年では加工中にインプロセスで加工物の寸法や温度等を測定して、その結果を加工の制御にフィードバックさせることにより、加工精度を高める方法が一般に行われている。しかし現在このような用途に用いられているセンサは測定精度が十分でなかったり使用条件や価格の面で、必ずしも満足のいく状態ではない。そこで本研究では小さなパイプの一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を測定して、もう一方の端面近傍に置かれた被測定物の変位を非接触で高精度に検知することのできる新しい変位測定法の実用化を目指している。これまでにパイプの発音機構と、被測定物の変位に伴う発音周波数変化の機構について理論的な解析を行ってきた^{(1)~(3)}。そこで本報では発音を司るさまざまな条件が発音周波数や変位と周波数変化との関係に及ぼす影響を実験によって明らかにした結果を報告

する。

2. 実 験 の 説 明

2.1 本変位測定法の原理 コンプレッサから送られてきた圧縮空気をレギュレータを通して任意の一定圧力に調節した後、ノズルからパイプの一端面に向けて吹き付ける。このときパイプに発生する音響の周波数および音圧レベルを測定する。一方被測定物の一つの面(測定面)はパイプのもう一方の端面と平行に向かい合うように配置してある。この被測定物に微少な変位が生じるとパイプ端面と測定面との間のすきまの大きさが変化し、パイプに発生している音響の周波数が変化する。被測定物の変位と発音周波数の変化との間には明らかな相関関係がみられ、発音周波数の変化を測定することにより被測定物の変位を知ることができる。

2.2 実験装置 被測定物の変位と発音周波数変化との関係を調べるために、図1に示すような実験装置を用いて実験を行った。実験装置に取付けられたマイクロメータヘッドのスピンデルを被測定物とし、そのスピンデルの移動に伴って生じる発音周波数の変化を測定した。パイプ中心線は被測定物であるマイクロメータヘッドの中心線と一致するように配置されてい

* 平成元年8月25日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月27日。

*¹ 准員、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。

る。またパイプはその中心線に沿って移動させ任意の位置に固定することができる。一方、ノズルはパイプ中心線上の1点を中心として回転させてパイプ端面に対し任意の角度 α (図3に示す)で空気を吹き付けることができる。なお、ノズルは内径 $\phi_n=1.0$ mm、ノズル先端とノズルの回転中心との距離が3.5 mmの位置に固定されている。

実験に用いたパイプの形状を図2に示す。パイプのノズル側外径を6.0 mmまで細めているのは、ノズルをマウス(パイプ開口部)にできるだけ近づけるためである。またマイクロメータヘッドスピンドルの外径は8.0 mmであるが、測定面の外径 ϕ_{mo} の影響を調べる場合にはスピンドル先端にアダプタを取付け外径を変化させて実験を行った。

発生音はパイプのノズル側端面上でパイプ中心線から20 mmの位置に配置したコンデンサマイクロホンで拾い、FFTスペクトラムアナライザに入力してフルレンジ20 000 Hz、分解能1.5625 Hzでピーク周波数を分析し、小数点以下1けためまでを採用した。なおこのスペクトラムアナライザの分解能はフルレンジ20 000 Hzにおいては最高0.1953 Hzに設定することができる。

2.3 実験方法 パイプの発音を司る種々の条件は被測定物の変位と発音周波数変化との間の相関関係に影響を及ぼす。そこで次に示す(1)~(8)の実験条件を変化させてその影響を調べた。

- (1) ノズルとパイプ端面との位置関係 I
- (2) 発音モード m
- (3) パイプ長さ L

図1 実験装置の構成

- (4) パイプ内径 ϕ_{pi}
- (5) 空気吹き付け圧力(ノズル内圧) P_n
- (6) 空気吹付け角度(ノズル角度) α
- (7) パイプの被測定物側外径 ϕ_{po}
- (8) 測定面外径 ϕ_{mo}

これらの実験条件のうち(1)~(6)は、マウス寸法やマウス上の空気の流れに影響を及ぼす条件であり、パイプが発音するか否かに大きな係わり合いを持つことが理論解析の結果わかっている。そのためすべての条件を一定にし着目条件だけを順次変えていく方法で実験を行ったのではピーク音圧90 dB以上を保つような適当な発音を得ることは困難である。そこで、本研究ではまずパイプ寸法 L , ϕ_{pi} , ϕ_{po} , 測定面の外径 ϕ_{mo} を選び、一定の圧力 P_n と角度 α でパイプに空気を吹き付けた。次にパイプをノズル側から被測定物の方向へ移動させて行き、所定の発音モード m が得られた位置にパイプを固定し、被測定物の変位と発音周波数との関係を調べる実験を行った。しかし所定の発音モード m が得られるようなパイプの位置にはいくつかの範囲があり、その範囲内でパイプ位置を0.10 mm間隔で移動させ、それぞれの位置において実験を繰り返した。したがって、同一条件ではあるがパイプ位置の異なる結果をいくつか得ることができた。このよ

図2 パイプの形成

図3 パイプの位置を示す変数 I

うにして着目条件を変化させた場合に生じる発音の困難さをパイプの位置を変えることにより補いながら実験を行った。

ノズルとパイプ端面との位置関係を示すために変数 I を導入する。図3に示すように、ノズル内壁の延長線とパイプ端面との交点を点Bとし、パイプ内壁の点Aと点Bとの間の長さを I とする。なお、点Bが点Aよりパイプ中心線側にあるとき I は正、パイプ側面側にあるとき I は負とする。したがってパイプをその中心線に沿ってノズルから離れる方向に移動させた場合、 I の値は大きくなる。

一方、実験条件(7)と(8)はパイプが発音するか否かに直接の関係はないので、適当な発音が得られるようにすべての発音条件を一定にし着目条件だけを変化させてその影響を調べた。

実験は測定面であるマイクロメータヘッドスピンドルの先端面をパイプ端面に接触させた状態を変位 $d=0\ \mu\text{m}$ として $d=500\ \mu\text{m}$ まで $10\ \mu\text{m}$ 間隔で変位を増していき、それぞれの変位 d に対する発音周波数 f を測定し図4を得た。着目条件を変化させて得られた図を比較検討する場合、 $d=500\ \mu\text{m}$ の周波数 f_{500} と最低周波数 f_{low} との差を周波数変化幅 δf とした。すなわち

$$\delta f = f_{500} - f_{\text{low}}$$

また、変位を $d=0\ \mu\text{m}$ から $500\ \mu\text{m}$ まで増加させていく間、ピーク音圧が $90\ \text{dB}$ 以上を示した場合について検討した。なお、実験は室温 25°C の恒温室で行い、温度変化による影響のないよう配慮した。

3. 実験結果

3.1 ノズルとパイプ端面との位置関係 I の影響

パイプの位置をその中心線に沿ってノズルから離し

図4 被測定物の変位 d に対する発音周波数 f の変化の一例

ていくと (I を大きくしていくと)、パイプに発生する音響は1stモードから2nd, 3rdモードへと高次の発音モードに移っていく。図5は1stモードの発音が得られるような範囲でパイプを移動させ、それぞれのパイプ位置 I における変位と発音周波数との関係を示したグラフである。それぞれのグラフの左端が $d=0\ \mu\text{m}$ を示している。ノズル角度 $\alpha=10^\circ$ でありパイプの位置は中心線方向に $0.10\ \text{mm}$ 間隔で移動させたので、 I の値は $0.10/\tan 10^\circ=0.57\ \text{mm}$ 間隔で変化している。 I が大きくなるに従って発音周波数帯は少し上昇し周波数変化幅もわずかに増加するが、グラフの形状はほとんど変化しないことがわかる。

3.2 発音モード m の影響 発音モード m は、パイプ位置を I が大きくなる方向に移動させたり、空気吹き付け圧力 P_n を大きくすることにより、高次モードへ変化していく。もちろん発音モード m が高次モードへ変わると発音周波数帯は高くなる。一方、周波数変化幅にも顕著な傾向がみられた。図6はそれぞれのパイプ長さ L 、空気吹き付け圧力 P_n においてノズルとパイプ端面との位置関係 I を順次変えて実験を行い、その中で最も大きな周波数変化幅だけを示したグラフである。図6より周波数変化幅は発音モード m に最も大きく依存し、 m が低いほど周波数変化幅が大きくなることがわかった。

3.3 パイプ長さ L の影響 パイプ長さ L を短くすると発音モード m を高くした場合と同様に発音周波数帯は高くなる。また、図6から周波数変化幅は1stモードにおいては L が長くなるに従って小さくなり、発音モードは L が長くなるに従って高次へと移っていくことがわかる。なお、2nd, 3rdモードでは $L=28\ \text{mm}$ より長いパイプでは発音が得られなかった。

図5 パイプ位置 I の変化による変位 d と発音周波数 f との関係への影響

3.4 パイプ内径 ϕ_{pi} の影響 パイプの共鳴周波数の式⁽²⁾にパイプ内径 ϕ_{pi} は含まれていない。しかし ϕ_{pi} の変化は、マウス上を流れる空気流の位相進角⁽³⁾や被測定物外径との相対的な関係に変化を与え、変位と発音周波数との関係に影響を及ぼすと考えられる。そこで ϕ_{pi} を変化させて実験を行った結果、周波数変化幅に影響がみられたので図7に示した。それぞれの ϕ_{pi} に対していくつかの結果を示しているのはパイプ位置を変えて実験を数回繰返したためである。例えば $\phi_{pi}=2.7$ mm では $I=1.0\sim 2.2$ mm の範囲で発音が得られたことを示している。この結果 ϕ_{pi} が小さくなるに従って周波数変化幅は大きくなることがわかった。 ϕ_{pi} の周波数変化幅への影響は図7において最大で1000 Hz以上を示しており、発音モード m に次いで大きい。また、発音が得られるパイプ位置の範囲は ϕ_{pi} が小さくなるに従って狭くなる。そして ϕ_{pi} が小さくなると発音は高次モードへと移っていく。どのモードの発音が得られるかはパイプやノズルの寸法と空気吹

図6 発音モード m 、パイプ長さ L の変化による周波数変化幅 Δf への影響

図7 パイプ内径 ϕ_{pi} の変化による周波数変化幅 Δf への影響 (図中の数字は I を示す。単位 mm)

き付け圧力との相対的な関係で決まるが、図7の実験条件では $\phi_{pi}=2.7$ mm より小さいと1stモードの発音は得られず次第に発音モードは高くなる。反対に $\phi_{pi}=3.9$ mm より大きいと発音が得られなかった。

3.5 空気吹き付け圧力 P_n の影響 空気吹き付け圧力 P_n が上昇することにより、マウス上を流れる空気流速が速くなり位相進角は減少する。図8に P_n と周波数変化幅との関係を示した。図8も図7と同様、それぞれの P_n において発音の得られる範囲でパイプ位置を変えて実験を数回繰返した結果を示している。 P_n が小さい領域では P_n の上昇に伴って周波数変化幅は大きく増加するが P_n が大きくなるに従って次第に一定値に近づく傾向を示す。また適当な発音が得られる P_n の範囲がある。図8の条件では $P_n=1.20\times 10^5$ Pa 以上では1stモードの発音を得ることはできなかった。なお発音周波数帯にはほとんど影響が見られなかった。また P_n の上昇に伴って高次の発音モードへと移っていく。

3.6 空気吹き付け角度 α の影響 空気吹き付け角度 α を変えても発音周波数帯や周波数変化幅にほとんど影響は見られなかった。しかし $\alpha=50^\circ$ 以上になると適当な発音を得ることができなかった。パイプに空気を吹き付けたときに音響が発生するためにはマウス上を覆うような空気流の層を形成することが必要であるが、 α が大きくなるに従ってこのような層の形成が困難になるために適当な発音が得られなくなると思われる。

3.7 パイプの被測定物側外径 ϕ_{po} の影響 パイプの被測定物側外径 ϕ_{po} は、測定面がパイプ端面に接している状態 (一端閉口) $d=0$ μm においては当然全く発音に影響を及ぼすことはない。測定面がパイプ端面から大きく離れてパイプの発音に全く影響を及ぼさ

図8 空気吹き付け圧力 P_n の変化による周波数変化幅 Δf への影響 (数字は I を示す。単位 mm)

図9 パイプ被測定物側外径 ϕ_{po} の変化による変位 d と発音周波数 f との関係への影響

図10 測定面外径 ϕ_{mo} の変化による変位 d と発音周波数 f との関係への影響

ないような状態(両端開口) $d=\infty$ においても、開口端補正量がわずかに変わる程度でほとんど発音に影響を及ぼすことはない。しかし一端閉口と両端開口の中間の状態においては、 ϕ_{po} の変化はパイプ端面と測定面との間の音響インピーダンスを変えるため、被測定物の変位と発音周波数変化との関係に影響が現れる。そのため図9に示すように ϕ_{po} が小さい場合、変位に対する周波数変化は急になり単位変位量当たりの周波数変化が大きいことがわかる。

3.8 測定面外径 ϕ_{mo} の影響 測定面外径 ϕ_{mo} が変化した場合を図10に示した。パイプの被測定物側外径 ϕ_{po} の場合と同様に、発音周波数帯や周波数変化幅ではなく被測定物の変位と発音周波数変化との関係に影響が現れる。図10より ϕ_{mo} が小さくなると変位に対する周波数変化は急になる。パイプ端面と測定面との間の音響インピーダンスが急に変化するか、あるいは徐々に変化するかによって曲線が変化し、音響インピーダンスの影響が大きいことがわかる。

4. おわりに

小さな両端開口パイプに空気を吹き付けたときに生じる音響の周波数変化を利用した新しい変位測定法について実験を行いその特性を調べた結果、次の結論を得た。

(1) パイプに発生する音響の周波数帯に影響を及ぼす因子は主に発音モードとパイプ長さであるが、ノズルとパイプ端面との位置関係によっても若干の影響が見られる。

(2) 被測定物の変位に伴う発音周波数の変化幅に影響を及ぼす因子は主に発音モードであるが、パイプ

の位置、パイプ長さ、パイプ内径、空気吹き付け圧力によっても影響が見られる。

(3) 空気吹き付け角度は発音周波数帯や周波数変化幅に影響を及ぼさないが、 50° 以上になると発音が困難になる。

(4) パイプの被測定物側外径や測定面外径は変位が小さい領域において変位と周波数変化との関係に影響を及ぼす。

(5) これらの結果を考慮して変位センサを製作する場合には、まず周囲の暗騒音の影響を避けるような周波数帯を選ぶためパイプ長さを適当に決めなくてはならない。次に1stモードの発音が得られる範囲内でパイプ内径を小さく空気吹き付け圧力を大きくすれば、被測定物の変位に対する発音周波数変化幅が大きく測定精度の良い変位センサとなり得る。

(6) 本報で行った実験結果の中で最も大きな周波数変化幅が得られた発音条件では $d=50\sim 250$ μm の変位に対して 2340.9 Hz の周波数変化が見られたので、10 Hz の周波数変化を読取ることにより 1 μm 単位の測定が十分可能であることが確認された。

(7) 変位の測定法として本方法は、構造が簡単で製作費が安く、1 μm 単位の高精度測定が可能であることから、広く実用に供し得るものと思われる。

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とりまとめたものである。

文 献

- (1) 一宮・宮下・後藤, 機論, 51-471, C (1985), 3077.
- (2) 一宮・宮下, 機論, 53-485, C (1987), 125.
- (3) 宮下・一宮, 機論, 54-503, C (1988), 1469.