圧電素子を用いた円管内移動体について*

(移動に関する基礎実験)

佐藤 啓仁^{*1}, 山本 純雄^{*1}
斎藤 秀次郎^{*1}, 池原 忠好^{*2}

Study on a Pipe Inside Mover using Piezoelectric Element

(Fundamental Experiment on Its Moving Performance)

Keijin SATO, Sumio YAMAMOTO,
Hidejiro SAITO and Tadayosi IKEHARA

Experimental study of a pipe inside mover which is made from a piezoelectric element is presented. It can travel inside a small diameter pipe, and has a function of forward and backward movement. Fundamental performances, i. e., the relationships among its velocity, power supply voltage, power supply frequency and tractive force are examined.

Key Words: Pipe Inside Mover, Forward or Backward Motion, Small Inner Diameter, Piezoelectric Element

1. 緒 言

円管内を移動する移動ロボットの研究開発は数多く行われているが^{(1)~(3)}, 細管, 例えば内径 10 mm 程度以下の円管内を移動する移動体についての研究は数少ないようである⁽⁴⁾。一方実際に使用されている円管には, 家庭用のガストープのゴム管や水道管のように内径が 10 mm 程度のものや, 各種油圧機器の配管など, 10 mm 程度以下の円管は多方面で使用されており, このような細管内の異常の有無を検査したり修理したりすることは, 設備システムの安全管理上重要な問題である。本研究は, まず移動方法について検討し⁽⁵⁾, 新しい機構の円管内移動体を試作した。試作した移動体は, 内径 11 mm の円管内を移動することが可能である。本移動体では, 前述の移動体⁽⁴⁾と同様圧電素子の振動を利用しているが, その振動方向を移動体の進行方向と同じ向きにしている点で機構が異なっており, 入力周波数, 印加電圧, およびけん引力と速度の関係, などについて実験を行い, 実用化の可能性について検討を行ったので, その結果を報告する。

2. 移動体の基本構造

本報告で検討した移動体の基本となる構造を図 1, 2 に示す。本移動体のアクチュエータには, 送信用の超音波センサ(村田製作所製, MA40S2S, 共振周波数 40 kHz)の振動部分に使われているものを用いた。大きさは直径 7 mm, 厚さ 0.4 mm の金属円板に, 一辺が 4.5 mm, 厚さ 0.1 mm の正方形の圧電素子が接着されたユニモルフ構造である⁽⁶⁾。図 2 で 1, 2 は長さがそれぞれ約 3 mm および約 2.5 mm, 幅が約 1 mm, 厚さが約 0.03 mm の黄銅板で, 図のように変形させて外面を半田でうすくぬった。その一端を金属円板 4 に半田付けし, 他端はその先端をまるく削り, 円管の内壁と接触させるようにした。また金属円板側と圧電素子側にそれぞれエナメル線を半田付けしてある。本移動体の質量は 0.12 g (自重 1.17 mN) である。またエナメル線まで含めると 0.4 g となる。アクチュエータに印加する電圧は方形波電圧とする。電圧を印加すると, アクチュエータはバイモルフ振動を起し, 金属円板の中心部と周辺部の振動の向きが互いに逆向きになり, 移動体全体が図 3 の波線に示すような屈曲振動をする。その結果両端にある黄銅板の先端はたわみ振動によって円管の内壁を小さくたたきながら, 移動体

* 原稿受付 平成 2 年 9 月 14 日。

^{*1} 正員, 宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市石井町 2753)。

^{*2} セイコーエフソン(株) (〒391 茅野市塚原 1-17-1)。

は矢印の方向に移動する。なお本報告において、移動体を移動させるために使用した円管は、すべて内径 11 mm の透明アクリル円管を使用し、移動時における移動体に付いているエナメル線は、実験時にはすべて 1 方向に引き出して実験を行った。そのため移動体はエナメル線を引きながら上昇または水平移動することになる。また次章以後に示す印加電圧値はすべて方形波電圧の両側振幅の値である。

3. 実験結果

本章では、図 2 に示した移動体の基本的な移動特性について実験を行い、更に種々の構造の移動体の移動特性を調べたのでその結果を述べる。

3.1 1 方向移動についての基礎実験

3.1.1 黄銅板付移動体について

(a) 印加電圧と速度の関係

円管を垂直に固定して、入力周波数を 46.5 kHz にし、印加電圧を 10~40 V まで変化させて、移動体の上昇速度を求めた。その結果を図 4 に示す。縦軸は速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V) である。実験はそれぞれの印加電圧において、3 回測定を繰返した。グラフはその平均値をとっている。データのばらつきは、各速度で最大約 ± 7 mm/s 以内である。このように実験

点がばらつくのは、薄い黄銅板と円管内壁との接触のしかたが、移動体を円管にセットする時に微妙に異なり、これが速度のばらつきとなって現れるものと考えられる。またこの場合必ずしも印加電圧を上げれば速度が早くなるのではなく、最大速度となるためには、黄銅板のばね特性および形状などに適した印加電圧があると推測される。

(b) 周波数と速度の関係

円管を傾斜角 0° , 30° , 60° , 90° に設定し、入力周波数を変化させて、それぞれの傾斜角における速度を求めた。印加電圧は 12 V とした。その結果を図 5 に示す。縦軸が速度 (mm/s)、横軸は入力周波数 (kHz) である。図中、例えば■印で示したものは、円管を垂直にした場合の結果である。図 5 よりいずれの傾斜角でも 47~47.5 kHz 付近において移動速度が最大となった。

(c) けん引力と速度の関係

円管を垂直に固定して、図 1 の移動体に重りなしと 0.98 mN, 1.96 mN の重りを付けた場合の種々の周波数に対する上昇速度を求めた。印加電圧は 12 V である。その結果を図 6 に示す。縦軸を速度 (mm/s)、横軸を入力周波数 (kHz) で表す。図中、例えば□印で示したものは、1.96 mN の重りを付けた時の上昇速

図 1 移動体の外形

1: 黄銅板 A 3: 圧電素子
2: 黄銅板 B 4: 金属円板
図 2 移動体の基本構造

図 3 移動体の屈曲振動

図 4 印加電圧と速度の関係 (垂直円管, 46.5 kHz)

度である。図6から、約2 mNの荷重下でも上昇でき、また最大の上昇速度となる周波数は、いずれの場合もおおよそ47.5 kHzの周波数であることがわかる。

3・1・2 りん青銅板付移動体について

(a) 印加電圧と速度の関係

黄銅板の代わりに長さ約3.5 mm、幅約1.5 mm、厚さ0.1 mmのりん青銅板を使い、移動体の構造を若干変更して実験を行った。本移動体は、円管内径よりも大きくし、両側のりん青銅板間の距離を12 mmにとった。このため、図3の移動体とは異なって図7のように円管内において移動体本体は傾けた状態で移動させた。本移動体に対して、円管を垂直にして、入力周波数を40 kHzとし、印加電圧を5~45 Vまで変化させて、移動体の上昇速度を求めた。その結果を図8に示す。図より明らかなように、最大速度は40 V付近において、約308 mm/sとなっている。

図5 周波数と速度の関係 (印加電圧 12 V)

図6 負荷を変えた場合の速度変化 (垂直円管, 印加電圧 12 V)

(b) けん引力と速度の関係

円管を垂直に固定して、種々の印加電圧を設定し、移動体に重りを付ける。その重りの重さを変えて速度を求めた。入力周波数は40 kHzであり、そのけん引力と速度の関係を図9に示す。横軸にけん引力 (N)、縦軸に速度 (mm/s)をとって表したもので、印加電圧を10 Vから30 Vまで5 Vおきに变化させている。図中、例えば■印で示したものは、電圧を10 Vにした時の関係である。同図より印加電圧が30 Vの場合、最大16 mNのけん引力を有することがわかる。これは自重の約13倍を持ち上げることに対応する。

3・2 2方向移動について

3・2・1 アクチュエータ2個による2方向移動につ

図7 傾いて移動するりん青銅板付移動体

図8 印加電圧と速度の関係 (垂直円管, 40 kHz)

図9 けん引力と速度の関係 (垂直円管, 40 kHz)

いて 3・1 節において、図 2、図 7 で示した移動体の 1 方向移動の可能性が明らかとなったので、次に前後移動や上下移動ができる 2 方向移動について検討した。まず 3・1 節で検討した 1 方向移動体を 2 個用いた場合について実験を行った。その構造を図 10、11 に示す。図 11 は、図 2 の黄銅板付移動体をお互いに反対向きにして接続したもので、お互いの振動が相手に伝わらないように間に吸振ゴム 1 を入れてある。吸振ゴムの大きさは外径 2.3 mm、長さ約 6 mm で、両側から連結金具 2 で止めてある。図 10 に示した移動体の質量は 0.28 g (自重 2.7 mN) である。両端のアクチュエータを同時に振動させ、黄銅板の先端と円管内壁との摩擦を静摩擦ではなく、動摩擦として摩擦力の軽減化を

図 10 2 方向移動体の外形

 1: 吸振ゴム 3: 前側アクチュエータ
2: 連結金具 4: 後側アクチュエータ

図 11 2 方向移動体の構造

図 12 傾斜角と速度 (印加電圧 12 V)

図る。移動方法は、2 個のアクチュエータには互いに違う入力周波数を加え、その周波数の違いで 2 方向に移動させる。2 個のアクチュエータに加える周波数は、前進の場合は前側アクチュエータに 43.5 kHz、後側アクチュエータには 39.5 kHz の周波数を加えた。また後進の場合は後側アクチュエータに 43.0 kHz、前側アクチュエータには 38.0 kHz の周波数を加えた。

次に 2 方向移動体の実験を行った。実験方法は、円管を水平位置から 10° 間隔で傾斜角度を増していき、垂直位置までの 2 方向の移動速度を求めた。その結果を図 12 に示す。印加電圧は 12 V で、図 12 は横軸に傾斜角 (°)、縦軸に速度 (mm/s) を取り、前進と後進の 2 方向を表している。図 12 の後進について (△ 印)、傾斜角 90° 付近で最大速度が表れている。これはエナメル線の影響のためで、傾斜角が 90° 付近であれば、エナメル線と内壁との接触による摩擦が少なくなり、下降速度が早くなったと考えられる。

3・2・2 アクチュエータ 1 個による 2 方向移動について

3・2・1 項ではアクチュエータを 2 個使用して、2 方向に移動ができるようにしたが、本項ではアクチュエータを 1 個のみ使用した 2 方向移動体について検討した。アクチュエータ 1 個で 2 方向移動ができれば、2 個を使用した図 10 の移動体の自重の半分となり、一つの入力信号で済む。検討した結果の構造を図 13、14 に示す。図 14 に示すように、図 7 の移動体に、圧電素子のついている面の反対側に長さ約 17 mm、幅約 1.3

図 13 保持板付移動体の形状

図 14 保持板付移動体の構造

mm, 厚さ 0.1 mm のりん青銅板を円弧状にたわみを持たせたもの(以後は保持板と呼ぶ)を取付けてある。図 14 に示すように保持板は、円管に挿入しない時は AB の状態であり、挿入すると AC の状態となり、D で接触する。移動体は保持板の弾性力によって後から押されて、円管内壁に接触している二つのりん青銅板は強く内壁に当たるようになり、移動体と内壁との接触圧はより強くなる。本移動体の保持板を含めた質量は 0.13 g (自重 1.27 mN) である。本移動体について以下に述べる 3 種類の実験を行った。

(a) 印加電圧と上昇移動速度の関係

円管を垂直に固定し、入力周波数 40 kHz とし、印加電圧を 10~45 V まで可変にして、上昇速度を求めた。その結果を図 15 に示す。図 15 は縦軸に速度 (mm/s)、横軸に印加電圧 (V) をとって示してあるが、最大速度は 40 V 付近で、264 mm/s を得た。保持板のない図 7 の移動体に比べると、最大速度差で約 44 mm/s 遅い。これは保持板と内壁との動摩擦が関係していると考えられる。

(b) 印加電圧とけん引力との関係

円管を垂直に固定して、移動体に重りを付け、印加

図 15 印加電圧と上昇移動速度 (垂直円管, 40 kHz)

図 16 印加電圧とけん引力との関係 (垂直円管, 40 kHz)

電圧を変化させて上昇速度を求めた。入力周波数は 40 kHz である。その結果を図 16 に示す。縦軸は速度 (mm/s)、横軸はけん引力 (N) である。図より、最大のけん引力は印加電圧 30 V において約 0.024 N であり、約 46 mm/s の速度で上昇することがわかる。この値は保持板が付いていない図 7 の移動体と比べると、約 1.5 倍のけん引力であり、自重の約 18 倍を持ち上げることに相当する。

(c) 印加電圧と水平および上下移動

円管を水平および垂直にして、保持板付移動体について、印加電圧を 5~40 V まで変化させ、水平と上下の 2 方向の移動速度を求めた。入力周波数は 41.5 kHz である。その結果を図 17 に示す。図 17 は縦軸に速度 (mm/s)、横軸に印加電圧 (V) をして示してあるが、図より明らかなように、移動体は水平移動 (○印) においては、印加電圧が約 14 V を境にして、それ以下の印加電圧だと後進し、それ以上の印加電圧だと前進した。また上下移動 (△印) においては、印加電圧約 12 V を境にして、それ以下の印加電圧だと下降し、それ以上の印加電圧だと上昇した。

4. 考察と結言

(1) 3・1 節の 1 方向移動体についての基礎実験では、図 2 と図 7 のような 2 種類の構造について、上昇移動速度の実験を行ったが、ある入力周波数および印加電圧に対して最大移動速度を生じた。この理由として、移動体の動的メカニズムは 2 章でもふれたように、移動体が円管に対して弾性板によって非対称に配置されているため、圧電素子による励振により金属円板が円管軸方向と円管壁方向に振動して、壁面と弾性板の間に一種のびびり振動を生じることによって移動を開始するものと考えられるが、その際、移動体全体の共

図 17 印加電圧と速度との関係 (水平および上下, 41.5 kHz)

振周波数よりも低い周波数では圧電素子の励振振幅が金属円板や弾性板によって吸収され、高い周波数ではその可動周波数範囲をこえるため、ある周波数範囲にピークを生じるものと思われる。また、電圧については、印加電圧の上昇により移動体の励振振幅が増大し移動速度も速くなるものと考えられるが、あまりにも大きな振幅では、軸方向と壁方向の連成振動の移動を生じる微妙なバランスが崩れるため速度の低下を来すものと思われる。また図4と図8の結果から明らかなように、りん青銅板付移動体は黄銅板付移動体よりも最大速度で十数倍も早い、この理由として、構造上の違いの他に剛性の差違が影響しているものと考えられる。

(2) 3・2・1項の2方向移動が可能となったのは、図6より明らかなように、けん引力は最大の上昇速度となる、約47.5 kHzの周波数付近では大きく、それ以外の周波数では小さいことと、静摩擦力より動摩擦力が小さいことが主要因と考えられる。また実験に使用した周波数以外の、他の周波数を移動体に加えても2方向移動が観測されたが、周波数の選択は移動体の速度が最大、またはけん引力が最大となるように選ばれよと思われる。

(3) 3・2・2項の実験において図14のような形を決めた理由は次のような実験結果に基づいている。図

7の両側のりん青銅板を広げて、きつく円管に入れた際に、低い印加電圧を加えた時に逆進を行った。このことから、図14のような保持板を考え、常にりん青銅板の先端が強い接触圧で円管に触れるような形状としたものである。本研究では、振動アクチュエータを2個使った入力周波数の変化による2方向移動体と、移動体に保持板を付けた印加電圧の変化による2方向移動体の二つのタイプについて考察したが、移動体としての実用化の可能性は十分あるものと考えられる。しかしながらいずれのタイプがより良いのか、また、より高速移動するための構造の問題や小形化の問題など、解決しなければならない問題が残っているが、今後の課題としたい。

文 献

- (1) 佐藤・鎌田・高津・森屋, 振動自走子に関する基礎的研究, 機論, 46-407, C (1980), 734.
- (2) 福田, 極限作業用知能ロボット, (1986), 102, マグロウヒル社.
- (3) 山本・佐藤・福島・斎藤, 弾性毛を用いた円筒内移動体について, 機論, 54-506, C (1988), 2471.
- (4) 青島・森光・辻村, 圧電振動を用いた細径管移動機械に関する基礎的研究, 機論, 55-516, C (1989), 1934.
- (5) 酒井, おもちゃの科学, (1977), 46, 講談社.
- (6) 内野, 圧電 電圧アクチュエータ, (1986), 78, 森北出版.