超音波による細管内移動カプセルの研究*

斎藤 秀次郎^{*1}, 佐藤 啓 仁^{*1}
工藤 功 琢^{*2}, 齊木 健 一^{*3}

Study of the Capsule Movement Inside a Small Pipe by Ultrasonic Wave

Hidejiro SAITO^{*4}, Keijin SATO,
Koutaku KUDO and Keniti SAIKI^{**}Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya University,
7-1-2 Yuto, Utsunomiya-shi, Tochigi, 321-8585 Japan

This study aims at the realization of capsule transport of the little type using ultrasonic wave. The ultrasonic wave produces the force which pushes the object in the propagation direction of wave, when it is obstructed by the object. This is the acoustic radiation force, and the capsule is moved in a small pipe by this force. In the experiment, a small diameter pipe is installed in the horizontal and vertical direction, and then ultrasonic wave is radiated from the end of a pipe, and the capsule movement inside a pipe is observed. The experimental results are shown in this paper. Next, the result was reported the movement method of the capsule using ultrasonic wave is investigated.

Key Words: Supersonic Wave, Materials Handling Equipment, Elevator, Capsule Transport, A Small Diameter Pipe, Acoustic Radiation Force

1. 緒 言

カプセル輸送とは、通常パイプの内径と同程度の直径をもつ円筒形のカプセルを管内流とともに輸送する技術のことである。作動流体としては、水(液体)および空気(気体)が利用され、前者は水力カプセル、後者は空気カプセルと呼ばれている⁽¹⁾。これらのカプセル輸送は、長距離輸送や、カプセルに積みればどんな形の物資でも輸送が可能であり、環境破壊、騒音、粉じん飛散などの公害が少なく、輸送は天候に影響されない。完全な自動運転方式がとれ、漏れを嫌う物も送れるなどの利点がある⁽²⁾。しかし、大量輸送の長所を生かすために大重量のカプセルを扱うことにより、カプセルの重量が増すことで投入や回収のハンドリングが大規模になって、設備費は高くなる。また流体をむだなく利用するために、次から次へとカプセルを送り込まなければならず、大きなカプセルではそれは容易で

はないなどの問題点や⁽¹⁾、さらに、空気カプセルでは、輸送経路のこう配に制限があるなどの問題点がある。

以上のように、カプセル輸送は大量輸送の手段として実用化されているが、少量輸送が必要とされるところもある。例えば、宝石や薬物、微量の検査資料などの少量輸送は、小型のカプセル輸送手段があれば、人手による運搬よりは、密閉されたカプセルのパイプ内輸送なので、安全性が保たれ、大変役立つと考えられる。

本研究は、このような少量のカプセル輸送の実現を目指し、超音波を使ったカプセルの移動技術について基礎研究を行った。超音波の伝搬は波動のエネルギーの流れであり、これを何かの物体で遮ると、そこには超音波の伝ば方向に物体を押す力が生じる、これが音響放射圧による力、つまり音響放射力である⁽³⁾。最近この音響放射力を利用して、物体の浮揚や搬送などの研究が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本研究では、この力をカプセル輸送技術に利用しようと考えた。本論文は、始めにカプセルの構造を示し、細管内の移動実験を行って、その実験結果を示した。さらに、超音波を使用してカプセルを細管内を移動させる手法に対して、考察を行ったので以下に報告する。

* 原稿受付 2001年7月2日。

^{*1} 正員、宇都宮大学工学部(☎ 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)。^{*2} 大日本印刷(株)BF事業部(☎ 162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1-1-1)。^{*3} (株)栃木ニコン(☎ 324-8625 大田原市実取 770)。

E-mail: saitohtd@cc.utsunomiya-u.ac.jp

2. カプセルの構造

細管内を移動するカプセルの構造を図1に示す。カプセルは一つの円筒軸と両端の薄い金属円板で構成されている。円筒軸は軽くて加工しやすいポリプロピレン製で、大きさは内径3mm、外形3.5mm、長さ5mmである。また、金属円板の材質はアルミニウムで、大きさは両端とも直径6.5mm、厚さ15μmである。金属円板は円筒軸の両端に接着剤で接着し、その円周面上が管内壁面と接触する。カプセルが移動するときは、図2のように、超音波送波器と向き合う金属円板は、超音波を受信する受信円板となり、反対側の金属円板は、送波器と受信円板とが平行に対面できるように保つためのものである。本カプセルは内径7mmの細管内を移動し、カプセルの自重は11.9mgである。

3. 水平移動実験

3.1 実験装置 図3に水平移動の実験装置の概略を示す。長さ1mの細管を水平に2台のマグネットスタンドで固定し、管端に超音波送波器を接触させる。発振器から、40kHzのパルスをアンプに入力し、アンプで電圧を増幅して、FFTアナライザで電圧を測定しながら、超音波送波器に印加電圧を与え、送波器から細管内に超音波を放射する。本実験以降、使用した細管はすべて内径7mmの透明アクリル材質のパイプを使用した。超音波送波器には、すべて空中超音波センサ(村田製作所製、MA40S3S)を使用し、送波器への印加電圧はデューティ比が50%の方形波

Fig. 1 The structure of a capsule

Fig. 2 The capsule in a pipe

パルスの電圧を与えた。また、本実験以降で示す印加電圧の値は、すべて両側振幅の値(V_{P-P})を表す。

3.2 印加電圧と速度の関係 超音波送波器の印加電圧の値を変えて水平移動速度を測定した。はじめに、管端から1mmの位置にカプセルを置いて、送波器から超音波を放射してカプセルを移動させる。放射して1秒後の移動距離を測定して、移動距離から速度を求めた。これを12回繰返して速度の平均値を算出した。そして、送波器の印加電圧を5Vから80Vまで5V刻みで変化させて、各電圧における速度の平均値を求めた。その結果を図4に示す。図4の縦軸は速度(cm/s)、横軸は印加電圧(V)を表す。図4の曲線は、測定データを最小二乗法で近似したものであり、近似曲線の式は、速度を v 、印加電圧を V とすると、

$$v = 0.004 V^2 + 0.022 V \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 3 The experiment system of horizontal move

Fig. 4 The relationships between applied voltage and velocity

となった。二次曲線による近似を行ったところ、相関比が0.996という結果が得られた。これは測定データに二次曲線がよく近似していることがわかり、速度は印加電圧の二乗に比例して大きくなっていく傾向となった。なお本節以降、グラフ内の縦線の幅は測定値のばらつきの程度を示す。

3.3 移動距離と速度の減衰について 3.2節の実験において、細管内をカプセルが移動していく距離が大きくなると、速度が小さくなることが観測された。そこで、移動距離の増加に伴う速度の減衰について調べる実験を行った。実験装置は、3.2節と同じ装置を使用し、管端から1 mmの位置にカプセルを置いて、超音波送波器の印加電圧を80 Vにし、40 kHzの超音波を放射して、1秒ごとの移動距離を測定して速度を計算し、これを12回繰返して、平均速度を算出した。その結果を図5に示す。図5の縦軸は速度 v (cm/s)、横軸は時間 t (s) を表す。図5の曲線は、測定データを最小二乗法で近似し、近似曲線で示したもので、近似曲線の相関係数は、0.983となった。また図5のように、時間 t の経過に伴って速度 v が減衰する傾向を近似曲線の式にすると、

$$v = 29.117 \times t^{-1.256} \quad (2)$$

となる。このような移動距離とともに速度の減衰が起きる原因として、媒質の吸収損失が考えられる。

3.4 水平移動の原理 超音波を管内に放射すると、超音波エネルギーの流れができ、カプセルの受信円板の表面に超音波の放射圧が受圧されて推力が発生し、カプセルを図6の F 方向に押し出す。これに対して、カプセルの移動を妨げようとして、図6で示す摩擦力が働く。そこで、カプセルが F 方向に移動するためには、静止摩擦係数を μ とし、移動体の質量を m 、重力加速度を g として、

Fig. 5 Attenuation of the speed by progress of time

$$\frac{1}{2} \mu mg + \frac{1}{2} \mu mg < F \quad (3)$$

式(3)の条件のとき、カプセルは移動すると考えられる。式(3)を確かめるため、実際に数値を代入して移動に必要な音圧を計算した。管内の超音波は、図6の F 方向にのみ音波が伝わる平面波とし、管内径が7 mm に対して移動体の受信円板直径は6.5 mm だから、ここで、カプセルの受信円板を閉管端と考える。平面波における放射力 F は、受信円板の面積を S 、超音波のエネルギー密度(単位体積当たりの超音波エネルギー)を E とすると、

$$F = SE \quad (4)$$

で表される。ここで、超音波のエネルギー密度を求めるには、まず、音の進行方向に垂直な単位面積を単位時間に通過する音のエネルギーである音の強さを求める。これを I とすると、 I は、

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad (5)$$

となる。ここで、 ρ_0 は媒質密度、 P は音圧、 c は音速を表す。これから超音波のエネルギー密度 E は、単位体積当たりのエネルギーであるから⁽⁶⁾、

$$E = \frac{I}{c} \quad (6)$$

となる。式(5)を式(6)に代入して、

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c^2} \quad (7)$$

となる。ここで、式(4)に式(7)を代入すると、

$$F = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c^2} S \quad (8)$$

となり、式(3)の F に式(8)を代入すると、

$$\frac{1}{2} \mu mg + \frac{1}{2} \mu mg < \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c^2} S \quad (9)$$

となる。ここで、実際に計測した各パラメータの数値を以下に示す。

$$m = 11.9 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_0 = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 346.7 \text{ m/s}$$

$$S = 3.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Fig. 6 The relationship between frictional force and thrust

$$\mu=0.67$$

式(9)に, 上記の数値を与えて移動に必要な音圧を計算すると,

$$P>817.0 \text{ Pa} \cdots \cdots (10)$$

となった。次に, 式(10)の値から, 実際に実験に使用した超音波送波器の送波音圧と入力電圧の関係を示す特性データから印加電圧 V を求めた。その結果電圧 V は, $V=5.5 \text{ V}$ となった。そのため移動に必要な印加電圧 V は,

$$V>5.5 \text{ V} \cdots \cdots (11)$$

となる。式(11)での印加電圧以下のカプセル移動の確認を 1 V , 2 V , 3 V , 4 V の各印加電圧につき 10 回行った結果, 移動は一度も確認できなかった。また, 図 4 の実験結果から, 5 V 以上の印加電圧での移動が確認されている。このように計算値と実験値はほぼ同じ数値を示した。以上の考察結果から, カプセルが水平移動するには, 式(3)の条件を満たすときと思われる。

4. 垂直移動実験

4.1 実験装置 図 7 に垂直移動の実験装置の概略を示す。長さ 30 cm の細管を垂直方向に, マグネットスタンドで固定して, 水平移動実験と同じ方法で, 超音波送波器に印加電圧を与え, 印加電圧の値を変化させて移動体の上昇距離を測定した。

4.2 印加電圧と上昇距離の関係 実験方法は, 超音波送波器を下部の管端と接触させて固定し, カプセルを送波器の上に置き, 40 kHz の超音波を放射して, 移動体の最大上昇距離を測定した。それを 10 回繰返して, 平均の上昇距離を計算した。そして, 印加電圧を 5 V から 80 V まで 5 V 刻みで変化させて各電圧での平均の上昇距離を求めた。その結果を図 8 に示す。図 8 の縦軸は上昇距離 (cm), 横軸は印加電圧 (V) を表す。図 8 の直線は, 実験データを直線で近似したもので, 直線近似式は, 上昇距離を h , 印加電圧を V とすると,

$$h=0.351 V-1.591 \quad (V>10) \cdots \cdots (12)$$

となる。相関係数は, 0.999 と非常に相関の高い値となった。移動体の上昇距離は, 送波器の印加電圧と比例関係にあると考えられる。しかし, 印加電圧が, 10 V 以下でのカプセルの上昇移動はしなかった。

4.3 上昇移動の原理 ここで, 同じ超音波の放射力を利用した超音波浮揚の研究があり, これは空間中での物体浮揚を目的とし, 非接触搬送や非接触駆動モータなどへの応用が研究されている⁽⁷⁾。本研究は, 超音波の放射力を細管内に伝搬させて, カプセルを上

昇させる推力に利用しようとする試みである。細管内を伝ばする超音波は, 図 9 の y 方向のみに伝ばする平面波として考察を行う。カプセルの受信円板を閉管端と考え, カプセルを上昇させる力は, 受信円板上にかかる音響放射力で, 上昇を妨げる力はカプセル自体が降下方向に働く重力と考えられる。上昇するための条件は, 音響放射力を F , 移動体の質量を m とすると,

$$F>mg \cdots \cdots (13)$$

式(13)の条件のとき, 移動体は上昇すると考えられる。このことを確かめるために, 3 章の水平移動における考察と同じ方法で上昇に必要な音圧を計算する。

式(8)と式(13)から,

$$mg<\frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho_0 c^2}S \cdots \cdots (14)$$

で表され, 式(14)に 3 章でのパラメータ数値を与えて音圧 P を計算すると,

$$P>998.0 \text{ Pa} \cdots \cdots (15)$$

となる。式(15)の値を, 実験に使用した超音波送波器の送波音圧と入力電圧の特性データから印加電圧 V

Fig. 7 The experiment system of vertical move

Fig. 8 The relationships between applied voltage and up distance

を求めた。その結果電圧 V は、 $V=6.2\text{V}$ となり、そのためカプセルの上昇に必要な印加電圧 V は、

$$V > 6.2\text{V} \dots\dots\dots (16)$$

となった。図8の実験結果から、印加電圧が10V以下でのカプセルの上昇確認はできなかった。このように計算値と実験値に3.8Vの差が生じたのは、送波器が10V以下の印加電圧では超音波の放射量が少なかったのか、それとも、両端の金属円板が管内壁面に接触しているため、接触による摩擦抵抗で放射量が小さいと、カプセルが上昇できなかったのか、または、受信円板の面積が管内径の面積よりもわずかに小さいため、超音波エネルギーが受信円板のすき間から漏れたため上昇できなかったのかなど種々の理由が考えられるが、今後、原因を解明する必要があると思われる。また、以上の考察結果から、式(16)の条件に合えば、音響放射力によるカプセルの上昇が理論的には可能であると考えられる。

5. 垂直搬送実験

次に、カプセルが上昇方向にどの位の重さの物を持ち上げるのかについて実験を行った。実験装置は図7と同じ装置を使用し、カプセルを管端に接触した超音波送波器の上に置き、さらにカプセルの上に上昇搬送させる物を載せ、送波器の印加電圧を80Vにして、40kHzの超音波を管内に放射して、カプセルの上昇距離を測定した。搬送する物体の重さはそれぞれ1.5mg, 3mg, 7mg, 8.5mg, 11.5mg, 14mg, 16mg, 17.5mg, とし、これらをカプセルの上に乘せて、それぞれ10回ずつ最大上昇距離を測定し、その各平均値を計算した。その結果を図10に示す。図10の縦軸は上昇距離(mm), 横軸は上昇搬送した物体の重さ(mg)を表す。図10の実線は各測定点の平均値を線で

Fig. 9 The relationships between climbing force and gravity

結んだものである。図10から、重さが大きくなることによって、上昇距離は反比例的に減少していく傾向を示している。1.5mgの重さのものを、約239mmまでもち上げたのに対して、移動体の自重とほぼ同じ重さの11.5mgは、約24mmまでしか上昇搬送できず、17.5mg以上の重さでは上昇しなかった。

6. 考 察

(1) 4章の垂直移動実験から、超音波送波器の印加電圧の値の違いで上昇距離が違ってくことから、印加電圧の大きさがある値に決めることにより、カプセルを垂直管内の指定する高さに停止させることができ、高さの位置調整が可能なカプセル移動となる。

(2) 本研究でのカプセル移動は、水平方向において1方向のみの移動であり、前進はするけれども後進はしない。これは、カプセルが超音波の放射力によって後から押されて、管内を前に移動する構造によるものである。カプセルが前後移動などの2方向移動すれば、さらに活用範囲が広がるものと思われる。例えば、往路と復路用の2本のパイプラインが1本で済むなどの利点がある。しかし、このためにはカプセルの構造を再検討する必要がある。後方から放射力を受けたとき、その力を逆進する推力に変換する機構を考える必要がある。

(3) 本実験では、超音波送波器として超音波センサを使用した。超音波の放射力がさらに大きい送波器を使用すれば、水平管内の移動距離も大きくなり、垂直管内の上昇搬送も、さらに重い物を持ち上げることができるとと思われる。しかし、長距離輸送については、超音波の届く距離は限られるので、輸送の途中で超音波エネルギーを補給する手段が必要となってくるとと思われる。

(4) 今後、実用化について考えると、パイプラインの敷設状況によっては、水平から垂直方向への曲管内移動やT字管内での分岐移動の問題、カプセル同

Fig. 10 The relationships between weight and up distance

士の衝突防止対策などの検討課題が挙げられる。

7. 結 言

本研究は、少量輸送を前提として、超音波の波動伝搬による、細管内のカプセル輸送への利用の可能性について、カプセル型移動体を製作して、移動実験を行って考察した。

本研究の結果から、超音波の放射力を使用して内径7 mmの細管の水平移動および上昇移動が確認できた。また両方向移動とも、移動原理の考察から、超音波の放射力と超音波送波器の印加電圧の関係を示し、カプセルが管内移動を可能とする条件を印加電圧から求めることが可能となった。そして、超音波の放射力によるカプセル移動は、細管内カプセル輸送として活用の可能性が出てきたと思われる。

最後に、本研究に対しご協力いただいた三菱重工業(株)泉 薫氏に深じんなる謝意を表す。

文 献

- (1) 辻 裕, 空気輸送の基礎, (1984), 137-138, 養賢堂.
- (2) スラリー輸送研究会, スラリー・カプセル輸送技術要覧, (1984), 20, 開発問題研究所.
- (3) 三留秀人, 音波の非線形現象とは?—その奇妙な振舞い—, 超音波テクノ, 7-8(1995), 59-61.
- (4) 三留秀人, 音波の非線形現象とは? —その奇妙な振舞い—「音波浮揚と音響流」, 超音波テクノ, 7-9(1995), 63-64.
- (5) 橋本芳樹, 超音波を利用した非接触物質搬送—キログラムオーダーの物体が空中に浮く—, 超音波テクノ, 7-10(1995), 48-50.
- (6) 根岸勝雄・高木堅志郎, 超音波技術, (1984), 152, 東京大学出版会.
- (7) 橋場邦夫・寺尾憲・久納孝彦, 超音波浮揚, 超音波テクノ, 9-2(1997), 28-31.