

博士學位論文

細管内移動体に関する基礎的研究

2005年9月

齋藤 秀次郎

博士學位論文

細管内移動体に関する基礎的研究

2005年9月

齋藤 秀次郎

目次

第1章 緒言	5
1.1 研究の背景	5
1.2 研究の目的	7
1.3 本論文の構成	8
第2章 移動技術について	11
2.1 はじめに	11
2.2 移動形態について	12
2.3 振動・波動について	13
2.3.1 振動輸送の例	13
2.3.2 波動輸送の例	13
2.4 種々のアクチュエータについて	15
2.5 考察	16
第3章 ワイヤ付き細管内移動体	17
3.1 はじめに	17
3.2 形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体	17
3.2.1 形状記憶合金について	17
3.2.2 形状記憶合金アクチュエータによる細管内移動体	18
3.2.3 移動体の構造	18
3.2.4 移動実験および考察	20
3.2.5 考察	21
3.3 電磁力アクチュエータを用いた細管内移動体	23
3.3.1 電磁力アクチュエータによる移動方法	23
3.3.2 電磁力アクチュエータを用いた1方向移動体	24
3.3.3 電磁力アクチュエータを用いた2方向移動体	25
3.3.4 電磁力アクチュエータ2個を用いた2方向移動体	27
3.3.5 保持部の改良について	28
3.3.6 考察	31
3.4 圧電アクチュエータを用いた細管内移動体	32
3.4.1 黄銅板付移動体の移動実験	32

3.4.2	りん青銅板付移動体の移動実験	34
3.4.3	圧電アクチュエータ 2 個による 2 方向移動体	35
3.4.4	圧電アクチュエータ 1 個による 2 方向移動体	37
3.4.5	改良型 2 方向移動体	39
3.4.6	内径 4mm の細管内を移動する移動体	44
3.4.7	ビニールチューブ内の移動について	47
3.4.8	考察	48
第 4 章	ワイヤレス細管内移動体	57
4.1	はじめに	57
4.2	超音波放射力を用いた細管内移動体	58
4.2.1	超音波放射圧について	58
4.2.2	超音波放射力による細管内移動	60
4.2.3	考察	62
4.3	圧電型加振機を使用した加振式細管内移動体	62
4.3.1	移動体の構造	63
4.3.2	実験装置	63
4.3.3	上下移動実験	64
4.3.4	考察	67
4.4	動電型加振機を使用した加振式細管内移動体	69
4.4.1	移動体の構造	69
4.4.2	移動実験と結果	69
4.4.3	考察	72
第 5 章	細管内移動体の理論的解明	85
5.1	はじめに	85
5.2	移動体についての理論的解析	85
5.2.1	移動体の構造	85
5.2.2	移動方法	86
5.3	移動原理についての理論的解明	86
5.3.1	印加周波数と移動速度の関係	86
5.3.2	印加電圧と移動速度の関係	87
5.3.3	移動解析と接触先端のモデル	88
5.3.4	数値計算	89
5.3.5	移動原理と力学モデル	93
5.3.6	運動方程式	93
5.3.7	移動シミュレーション	100
5.4	弾性板の斜め接触による摩擦の特性	102

第 6 章	細管内移動体のカプセル輸送としての応用	111
6.1	はじめに	111
6.2	パイプライン輸送について	111
6.2.1	カプセル輸送の特徴	112
6.2.2	カプセル輸送の分類	113
6.2.3	カプセル輸送の今後の課題	114
6.2.4	カプセルの移動方法	116
6.3	管端からの超音波放射による細管内移動カプセル	116
6.3.1	カプセルの構造	116
6.3.2	細管内の超音波放射によるカプセル移動	118
6.3.3	超音波の連続放射とバースト波断続放射の比較	119
6.3.4	超音波の連続放射による印加電圧と前進速度の関係	119
6.4	細管の加振によるカプセル移動	122
6.4.1	前進移動	123
6.4.2	後進移動	124
6.4.3	印加電圧と最大前進距離	125
6.4.4	細管の振動波形	126
6.4.5	考察	127
6.5	長距離細管内移動カプセルについて	132
6.5.1	長距離細管内移動カプセルの目的	132
6.5.2	カプセルの構造	132
6.5.3	カプセルの長距離移動方法	133
6.5.4	カプセルの長距離移動実験	133
6.5.5	考察	134
第 7 章	細管内移動体の荷役運搬機械としての応用	136
7.1	はじめに	136
7.2	荷役運搬移動体としての応用	137
7.2.1	超音波放射力を利用した荷役運搬移動体	137
7.2.2	移動体の構造	137
7.2.3	水平移動実験	137
7.2.4	垂直移動実験	143
7.2.5	垂直上昇搬送実験	147
7.2.6	考察	147
第 8 章	壁面間移動体としての応用	149
8.1	はじめに	149
8.2	壁面間移動体について	149
8.2.1	弾性板型壁面間移動体の移動方法	149

8.2.2	壁面間移動体の構造	150
8.2.3	実験方法	151
8.2.4	実験結果	152
8.2.5	考察	153
第9章	結言	155
9.1	各章のまとめ	155
9.2	全体を通しての結論	157
9.3	今後の課題	159
	謝辞	161
	参考文献	162
	参考論文等目録	166

第1章 緒言

1.1 研究の背景

我々を取り巻く生活環境の中で、金属や樹脂などで作られている配管は至る所に存在しており、中でも細管はさらに密接に沢山敷設されて使用されている。例えば、実際に使用されている細管には、家庭用のガスストーブのゴム管や水道管のように内径10mm程度の細管や、各種油圧機器の配管など、10mm程度またはそれ以下の細管は多方面に使用されている。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り、これらの細管は、使用年数が過ぎてくると、細管内部に腐れや詰まりを起こす。これだけ多く使用されている細管であるため、腐れや詰まりを常にどこかで存在しており、このため、衛生管理上から細管内を検査したり清掃する必要がある。そして、検査や清掃は定期的に細管内を移動して点検作業を行っていく、または清掃する細管内移動ロボットがあれば非常に有益であり、大変な省力化となる。しかし、これらの腐れや詰まりは簡単に清掃できれば問題はないのであるが、中には危険な場所で作業を行うこともあり、さらに細管のトラブルは大きな事故や問題を引き起こすこともある。

現在、細管がもとでの事故は原子力発電所やその他至る所で起きており、そのいくつかの事故例を新聞記事から拾い上げると、

1. 1991.6.2. 朝日新聞記事から抜粋、茨城県東海村の原子力発電所で、タービン蒸気を冷やす「復水器」の金属製細管(直径23mm)にムラサキ貝と呼ばれる小さな貝が付着してトラブルを起こしている。ムラサキ貝は細管内壁に付着して成長し、細管内の海水の流れを乱し、その乱れた流れで細管が削られ、穴があくという。このトラブルは他の発電所でも同じように時々起きており、養殖場などが近くにあるために薬物などは使えないという。発電所では、これらのムラサキ貝の駆除作業を行うため、タービンを止め発電出力を落とし

て、三万二千本の細管を1本1本ブラシで掃除して、細管の傷の有無を検査した。これは大変な作業であり、相当な労力が必要になる。

2. 1991.6.11. 朝日新聞記事から抜粋，関西電力美浜原発2号機で蒸気発生器細管(外径22mm)が突然破断した。これは、「流力弾性振動が発生し、金属疲労を招き破断した」と推定しているが、振れ止め金具が正しく入っていなかった11本の細管の中で、破断細管近くの少なくとも4、5本の細管が極めて同じような条件にありながら、なぜ1本だけが破断したのか、また、破断のきっかけとなった亀裂の発生原因の解明も進んでいないという。この原因解明には、検査ロボットが細管内部を移動し管内検査を行えば、事故原因の解明は可能であったかも知れない。

3. 1997.4.17. 読売新聞記事から抜粋，宇宙開発事業団は種子島宇宙センターで、次世代ロケットエンジンの中の高圧の液体水素をターボポンプに送り込む細管に亀裂が入っているのが見つかった。原因は細管がエンジンと共振しやすい形状であるため、激しい振動で金属疲労を起こしたことが細管亀裂の原因と判明した。

この他にも、細管が原因のトラブルは種々の所で起きている。これらに対応する、細管内部を移動するロボットの研究開発は盛んに数多く行われているが、例えば内径10mm程度の細管内部を移動しながら検査修繕する実用化移動ロボットは非常に数は少ない。

この間にも、住宅や工場、ビルディングなどの建物の中での細管は、ガスの供給や飲用水用の配管として使われている他に、生活環境のあらゆる所にいろいろなことで利用されている。しかも、細管をもっと利用することにより、さらに良い生活ができるのではないかと考えられる。例えば、細管を利用して小物の搬送など、建物内の階下や階上に細管を敷設して、小物搬送が可能であり、人間が運ぶ手間がなくなれば省力化となる。また、細管を建物内の壁の中を通すことにより、人の目に触れることなく小物搬送が可能となり、病院の病室内での薬の搬送などは、人の手を経由して運ぶよりも衛生的であり、保安上などの安全な搬送が可能である。

ところが現在、細管内部を移動する技術は、種々の問題が存在しており、特にその中でも大きな課題は、細管内部を移動する移動体にエネルギーを供給する方法についての問題である。この細管内部にエネルギー供給する問題が確立できれば、細管内部移動ロボットの開発はさらに発展するのではないかと思われる。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、細管内を移動体が移動するための様々な問題についての検討を行う。それは直管や曲管などの細管内を自由に移動できるような種々な構造の移動体の検討であり、移動体のどの構造のものが最適なのか、実際に移動体の試作を行い、移動実験を行う。

また、細管内を移動するためには移動推力が必要となり、このための考察も行う。細管内を移動する移動体の推力にはアクチュエータが必要となり、それには空気圧、油圧、電気モータなどの既存のアクチュエータ技術についての検討を行い、細管内を移動するという特殊な設定から、アクチュエータの構造についても、どのような形状のアクチュエータが最も細管内移動の使用に適しているかについての考察も行う。特に細管内移動には、軽量で簡単な構造で、しかも微小化が可能なアクチュエータが最適とされ、電磁力アクチュエータ、形状記憶合金型アクチュエータ、圧電アクチュエータについて、検討を重ねていろいろと移動体の構造を考案し試作して、細管内移動の実験を行って考察を行う。

次に研究の対象となるのは、細管内を移動するために必要なエネルギーの供給方法であり、どのような移動体でも移動するため必要となるのはエネルギー供給問題である。細管内を移動するという特殊な環境において、どのようにエネルギーを供給するかについて検討を行う。このエネルギー供給問題は大変重要な問題であり、エネルギー供給方法が変わればそれに伴って移動体自体の構造が変わり、移動距離などの活用範囲もエネルギー供給方法によって変わることになる。また、細管内の長距離移動にはワイヤレス型の移動方法が最適となり、そのための非接触エネルギー供給方法の検討も必要となってくる。これらの問題についても解決を与えるため、細管内移動体に対する種々のワイヤレスエネルギー供給方法についても検討を行う。

さらに、細管内移動体の移動原理を科学的に解明するために、理論的な根拠を与えるための解析を行う。この方法は移動原理についてモデルを構築して、運動方程式を導出し、運動方程式から数値計算を行い、細管内移動体の移動機構の解明を行う。

続いて、細管内移動体の応用開発問題について、実際的にその実現可能性の検討を行う。本論文では、細管内移動体が今後応用開発できそうな問題について、三つほど実験研究例を示す。そして、それぞれに移動体の構造を検討し、試作を行って移動実験を行い、実

用化の実現可能性について、検討を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は以下のように構成されている。

第1章は、本研究を行うに当たっての発端となる社会問題や、細管内移動体の開発が私たちの生活環境の中で大変必要とされていることなどについての研究の背景を説明し、この問題に対してどのような動機を持って研究を行ったか、将来実用化を目指すためにはどのような課題に取り組む必要があるのなどについて述べてある。

第2章は、細管内を移動するための一般的に知られている移動形態について説明し、次に、細管内移動体の移動推力となりうる振動や波動について、実際にそれらを使った物資の搬送方法についてその参考例を示し、細管内移動体に利用可能の検討を行い、また、細管内移動体のアクチュエータとして利用可能な種々のアクチュエータについて述べている。

第3章は、ワイヤ付き細管内移動体として、移動体にエネルギーを供給する方法として、ワイヤを使ってエネルギーを供給する方法を紹介する。ここでのワイヤによるエネルギー供給方法は、細管内を移動するという条件のため、あまり大きいサイズのアクチュエータは使用できず、小型化が可能な3種類のアクチュエータを使い、アクチュエータの力が細管内移動に際して最適に力を発揮できるような細管内移動体の構造を考案し、実際に試作した、3種類のアクチュエータとは、形状記憶合金を利用したアクチュエータ、電磁力を利用したアクチュエータ、圧電素子を利用したアクチュエータによる細管内移動体であり、本論文では、これらのアクチュエータを利用して、試作した移動体を使い、それらを動作させて、細管内を移動させ、印加電圧や印加周波数を与えて移動速度を測定した。その実験結果から、移動特性を考察した。

第4章は、細管内移動体にケーブルレスによるエネルギー供給方法について述べてある。一つ目のケーブルレスエネルギー供給方法は、細管の管端から超音波を放射して移動体を細管内移動させる方法や細管端を加振して移動体を移動させる方法である。二つ目の方法は、細管の途中に加振機を接触させて、或いは細管を掴んで加振させて、その細管の加振力により移動体を移動させる方法である。この細管

に加振機を接触させて加振する方法は、圧電アクチュエータによる20kHzという高速の加振振動数による加振を与えて細管内を移動させる方法と、また、細管を掴んで加振させ方法には、動電型加振機による数百Hz程度の加振振動数による細管を加振させて移動させる二通りの加振方法について、細管内移動実験を行って、その実験結果を報告するとともに、考察を行った。

第5章は、細管内を移動するための理論的な解析を行った。本研究における移動体の特長は、移動体本体に接続されている弾性板の先端が、細管壁面に対して斜めに接触しており、弾性板を振動させることにより、その振動が細管内壁に伝達されることによって、その伝達力が移動推力となり、細管内を移動するという特長である。理論解析では、この弾性板の先端が細管壁面に接触する部分の挙動に着目し、モデル化を行って、運動方程式を導出した。導出した運動方程式にパラメータを与え、数値計算を行って計算結果を示した。さらに、モデル化した実際の移動体の移動実験の結果と数値計算を行って出力した結果との比較検討を行って、その結果を報告してある。

第6章は、細管内移動体がどのようなところで使用可能か、その応用について検討を行った。その結果、実際に細管内を移動するカプセル輸送を想定して、細管内移動体をカプセル構造に改良し、細管内を移動させて輸送実験を行って、その実験結果を報告した。そして、細管内移動体がカプセル輸送として応用が可能かどうか考察を行った。カプセル輸送を行う媒体として、長距離輸送を可能とすることとし、ケーブルレスエネルギー供給方法とするために、超音波放射力を使った方法や細管を途中で加振する方法でカプセル輸送させることを条件において検討を行った。

第7章は、カプセル輸送以外に、どのような場所でどのような方法で応用可能か検討し、その結果、カプセル輸送ではなく物資自体を運ぶ搬送手段として、応用の可能性を検討した。そして、細管内を搬送する荷役運搬機械として応用することが可能かどうか検討を試みた。細管内の物資搬送は、細管内をカプセル輸送することとあまり利用方法としては、変りがないように見えるが、カプセルに入れずにそのまま形が崩れなければ、細管内物体搬送という荷役運搬機械として、細管内移動体の応用が可能である。本章では、形が崩れない物体の重さを変えて垂直搬送実験を行い、その結果を報告し

である。

第8章は、本研究で行っている細管内移動体の移動特徴は、平行な壁面間をも移動できることであり、このことから応用開発を行えば、細管内を移動するだけでなく、平行な壁の間も移動することも可能である。例えば建物と建物の間なども平行な壁であり、細管の壁面間を移動するのと同じ移動状況であると考えられる。このため、細管内移動体の移動技術を壁面間移動技術にも応用できると考えられる。そのために平行な壁面を作り、実際に壁面間を移動する移動体を製作して、壁面間移動実験を行った。そして、その実験結果を示して、細管内移動体が壁面間移動体として応用が十分可能であることを示した。

第9章は、本研究を行ってきた研究成果に対する結論を述べる。それは大きく二つに分けて、始めに各章についてのまとめを列挙し、その後本研究全体を通しての総括的な意見と考察を述べる。次に、細管内移動体の今後の展望について、細管内移動体を今後開発していく上で、どのような方面へ研究を進めていくことが良いのかについて、その考察結果を述べる。

第2章 移動技術について

2.1 はじめに

移動機械一般の移動環境を最も大きく区分すると、環境構成する物質の有無及び相(固体, 液体, 気体)によって図 2.1 に分類できる。図 2.1 の中で, 固体-液体境界面を移動する物体に対して, 固体は移動物体に拘束を与える。この拘束には, 地面, 壁面のような面的拘束と, レール, ケーブル, 管路のよな線的拘束とがある。面的拘束では, 移動物体が重力に抗して積極的に自己を保持しなければならない壁面, 天井面と, その必要がない地面, 床面とに分かれ, さらにそれぞれが平坦面と凹凸面はさらに階段のように規則的なものとランダム路のような不規則なものに分けられる [1]。

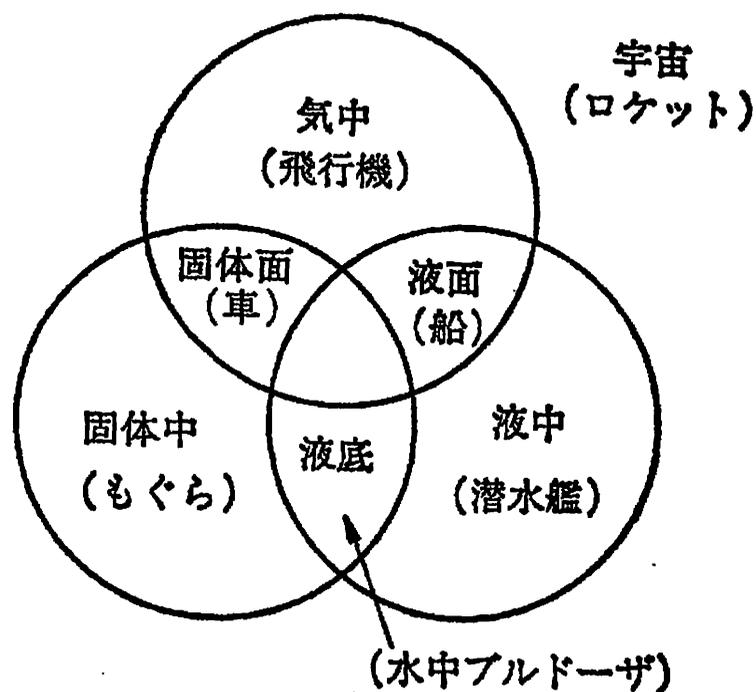


図 2.1: 移動環境の分類

2.2 移動形態について

このような種々の環境内を移動するために移動物体はそれに適した様々な形態をとる。地面移動に限っていれば、車輪、クローラ、脚、体幹が4大形態である。移動形態を図 2.2 に示す。

車輪は生体には見られないが平坦地で非常に効率の良い移動形態である。

クローラもまた生体には見られない形態である。車輪よりも凹凸の険しい不整地での移動に利用される。

脚と体幹は生体に見受けられる形態である。体幹とは、生物でいえばミミズ、へび、けむしなどに見られるもので、蛇のうろこ、毛虫の毛は、それ自体能動的な機構ではないということで脚とみなさない。脚は凹凸面移動に、体幹は管内移動のような空間的に限られた形での移動に用いられることが多い。

当然この4大形態の組合せがあり、脚車輪ロボットや索状能動体などである [1]。

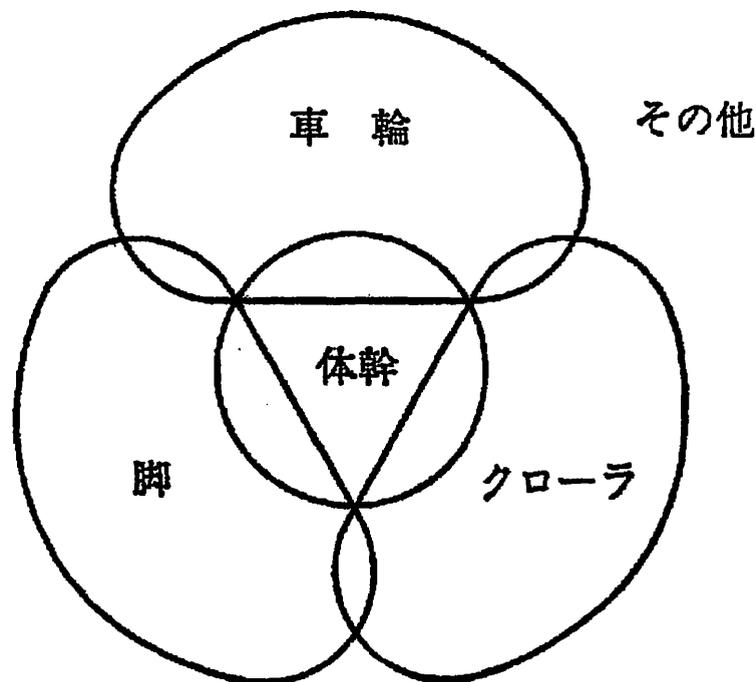


図 2.2: 移動形態

2.3 振動・波動について

2.3.1 振動輸送の例

振動とは、柱時計の振り子のような、又は池に小石を投げたときにできる波状の模様のような「繰り返し」の現象である。この時間的に変動するものには、ずっと続いて振動していくものもあれば、断続的に動くものやたまに動くものがある。これらは、ある動きを継続させようとする力と変化を元に戻そうとする力の、相互作用によって振動が継続しているのがわかる。ここで、ある動きをさせようとする力は慣性力であり、変化を元に戻そうとする力は復元力である。振動とは慣性力と復元力が交互に働いている現象である [2].

一般的に振動を使って振動輸送をする実際例としては、振動している面上に輸送物体を乗せ、物体は相対すべりや跳躍運動を繰り返しながら一定の方向に物体を輸送することができる。このような機械的振動を積極的に利用して物体を移送する方法を、一般に「振動輸送」と呼ぶ。振動輸送は振動フィーダや振動エレベータ、振動コンベアなどさまざまな形で機械部品や原材料の輸送・供給装置として広く利用されている [3].

2.3.2 波動輸送の例

振動がある場所での時間的な変化であるのに対して、波動は時間的な変化に止まらず、空間(場所)的な変化をも示す。この空間的な変化はシステムに固有の伝搬速度で伝わっていく。これはちょうど池の中に小石を投げ入れたときにできる水面の変形が四方に伝搬していく様子を中心からの一つの直線に沿って眺めたものと似ている。つまり、数学的に言えば、振動が時間に関する常微分方程式で記述されるのに対して、波動は時間と空間に関する偏微分方程式で記述されるという相違がある [4].

波動は運動量の流れと密接に関係した問題のひとつであり、物体が吸収したり反射したりする波によって受ける力学的な力であるという。例えば、気体中の縦波(音波)は、それが通る面に圧力を与え、この圧力の存在は波による運動量の輸送と関係している。波が面に及ぼす力は、エネルギーの流れの時間的割合を波速で割った大きさと与えられる [5].

音波を利用した物体移動について、音波内に置かれた物体は音の放射圧によって力が働くということが、音響非線形現象として古くから知られている。近年この現象を利用して物体を空中に浮揚させる試みがなされており、橋本ら [6] は、浮揚距離は数 μm ~ 数百 μm と小さいものの、波長より大きく、質量が数 g ~ 数 kg のかなり大きく重い物体を音波によって浮揚及び搬送が可能であることを示した。これによって超音波浮揚の工業的応用の可能性が大きくなったと思われるが、その原理や特性はまだ完全に解明されたわけではないという [7]。

超音波浮揚の特徴の一つに、浮揚する物体の材質を選ばないことが利点となっている。また、図 2.3 のように、進行波を用いることにより、浮揚力とそれに垂直な推進力を得ることができ、これによって橋本ら [8] は、平板にたわみ進行波を励起させることで、物質の比接触搬送が可能であることを示している。

超音波浮揚の技術は、まだ機構・特性に関して未解明の部分があるが、電磁力に匹敵するほどの力が得られれば、構造の軽量化・小型化・単純化・さらに低コスト化・省力化が可能になり、今後の浮揚力や駆動力がどこまで大きくできるが今後の課題の一つになるといわれている [7]。

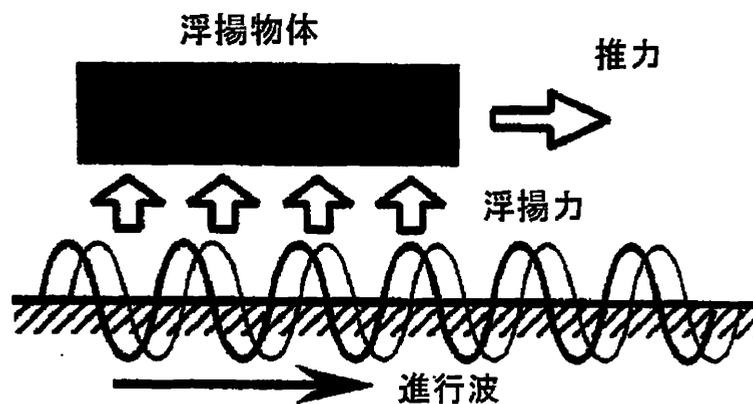


図 2.3: 浮揚力と進行波による推力の発生

2.4 種々のアクチュエータについて

アクチュエータは、各種形態のエネルギーに変換を施して機械的動力を得るための機器の総称であり、その種類は、従来型のアクチュエータばかりでなく、次世代に活躍が期待される、新しい原理に基づくアクチュエータなど多種多様がある。どのようなアクチュエータがあるか、以下に挙げると、

(1) 油圧アクチュエータは、圧油のエネルギーを利用したアクチュエータ(油圧シリンダ、ピストンモータ、歯車モータ、ベーンモータなど)である。

(2) 空気圧アクチュエータは、圧縮空気のエネルギーを利用したアクチュエータ(空気圧シリンダ、ベーンモータ、エアタービン、ベローズ、ダイヤフラム、ゴム人工筋など)である。

(3) 電気アクチュエータは、電流と磁界との相互作用、磁気間の吸引力、反発力、圧電効果等を利用したアクチュエータ(直流モータ、交流モータ、ステッピングモータ、電磁石、ソレノイド、ムービングコイル、リニアモータ、超音波モータ、積層PZTアクチュエータなど)である。

(4) 熱アクチュエータとして、スターリングエンジンは、作動ガスと呼んでいる空気やヘリウムなどの気体をシリンダ内に閉じ込めて、外部からこの作動ガスの圧力を上昇・下降させて、ピストンを駆動して動力を発生する。したがって内燃機関ではなく外燃機関である。

(5) 水素貯蔵合金アクチュエータは、平衡水素圧は温度とともに上昇するが、圧力の対数と温度の逆数には直線関係がある。このため、水素を吸った合金の温度を上げると、吸熱しながら水素を放出し、ガス圧が上昇する。逆に冷却すると、発熱を伴いながら水素を吸収するため、ガス圧は低下する。平衡状態に限っていえば、合金の温度を変えることでガスによる発生力を制御することができる。

(6) その他のアクチュエータとして、形状記憶合金の温度による相変化を利用したアクチュエータ、高分子材料の膨潤を利用したアクチュエータ、磁界の変化に伴う磁性流体の移動を利用したアクチュエータ、光を照射することによってアクチュエータ内部にエネルギー変換が行われる光アクチュエータなどがある [9]。

2.5 考察

本章の考察として、細管内移動体の研究を行うに当たって、特に移動する技術に関して記述し、本研究を行うに当たっての必要となるアクチュエータ等の検討材料をまとめたところで、細管内を移動するためには移動体を製作する上での条件として以下のものが抽出された。

① 移動体はできるだけ軽量であること。

移動体の自重が小さければ、移動推力が少なく済む、特に細管内を上昇移動するときは、移動体の自重が大きく影響してくる。

② 移動体の構造が単純であること。

構造が単純であれば、移動体を構成するための部品点数が少なく済み、移動体本体がなるべくコンパクトな構造をすることができ、小型化が可能となる。

③ 移動体は前後移動あるいは上下移動の2方向移動ができること。2方向移動ができれば、万一細管内に詰まったとき移動体は後進して戻ってこられる。

④ 前後移動又は上下移動の移動方向の切り替えが簡単なこと。

移動体本体に切替装置を接続すると、その分移動体の構造が複雑になり、自重も重くなる。

以上のことから、細管内移動体を製作するときには、上記の項目を考慮に入れて製作する必要がある。

第3章 ワイヤ付き細管内移動体

3.1 はじめに

細管内移動体を開発していく上で、問題点の一つとなるのが、いかに細管内移動体にエネルギーを供給するかであるが、移動体にエネルギーを供給する場合、現在はほとんどがワイヤによるエネルギー供給方法である。それでは細管内移動体にエネルギーを供給する場合、どんな方法によるエネルギー供給が可能なのか、検討を行った。その結果、3種類によるエネルギー供給方法について、検討を行ったのでその結果を以下に報告する。

3.2 形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体

3.2.1 形状記憶合金について

a, 形状記憶合金の原理

形状記憶合金は、金属組織の変態を利用しており、形状記憶効果とは、低温側のマルテンサイト相で変形させると、一定限度内の変形ならば結晶は向きを順々に変えて変形をまかなうという一種の双晶変形により変形する。

これは、みかけ上は通常の金属材料の塑性変形と変わらないが、通常の金属材料のように結晶が滑るのでなく、単に結晶が向きを変えただけであるから、結晶間のつながりはそのまま保たれている。そこで、温度を上げてオーステナイト相に逆変態させると原子がもとの配列に戻るので、全体としてもとの形状に復帰する。

b, 形状記憶合金の種類

・銅系合金

安価であるが、繰返しの性能が劣るため、安全装置などの繰返しの少ない用途に使われる。

・HiTi系合金

繰返しの寿命の点で特に優れており、応力腐食割れの心配がない。この金属は鉄またはコバルトを数%添加すると加工硬化させることができ、その弾性特性が利用できる。

ロボットなどに応用されている形状記憶合金は、バネと組み合わせる方法やHiTi系合金同士を接続させて使用方法がある。HiTi合金線は張力を設定しやすいという長所がある。また短所としては、位置制御が難しい、ばねの張力が常にかかる、放熱して元に戻るまでの時間がかかるなどである [10]。

3.2.2 形状記憶合金アクチュエータによる細管内移動体

形状記憶合金アクチュエータを使用した細管内移動体を製作し、移動実験を行ったので、その結果を述べる。形状記憶合金アクチュエータを使用した移動体の移動方法には、2種類の駆動方法が考えられる。一つは、図3.1のように、毛虫の毛のたわみを利用するような移動方式が考えられる。毛のたわみを利用する方法では、斜めに植えつけた毛を板をシーソーのように開閉することによって移動する。もう一つは、図3.2のように、尺取虫のような移動方式で、尺取虫方式は毛の保持力と移動体全体の伸縮を利用したような移動方法である。

3.2.3 移動体の構造

次に、2種類の移動体の構造を図3.3と図3.4に示す。図3.3は毛のたわみを利用した移動体の構造を示す。この構造は移動体本体の亚克力板に斜めに弾性毛を植え付けて、亚克力板と亚克力板の上下の間にゴムを取り付けた構造で、亚克力板の両端にコイル型の形状記憶合金アクチュエータを取り付けて、その形状記憶合金を交互に通電して伸縮させ、移動体本体を交互に傾きを変えて移動する構造である。

また、図3.4は尺取虫方式を利用した移動体の構造を示す。毛の長さは短くできるので、内径7mmの細管の中を移動することが可

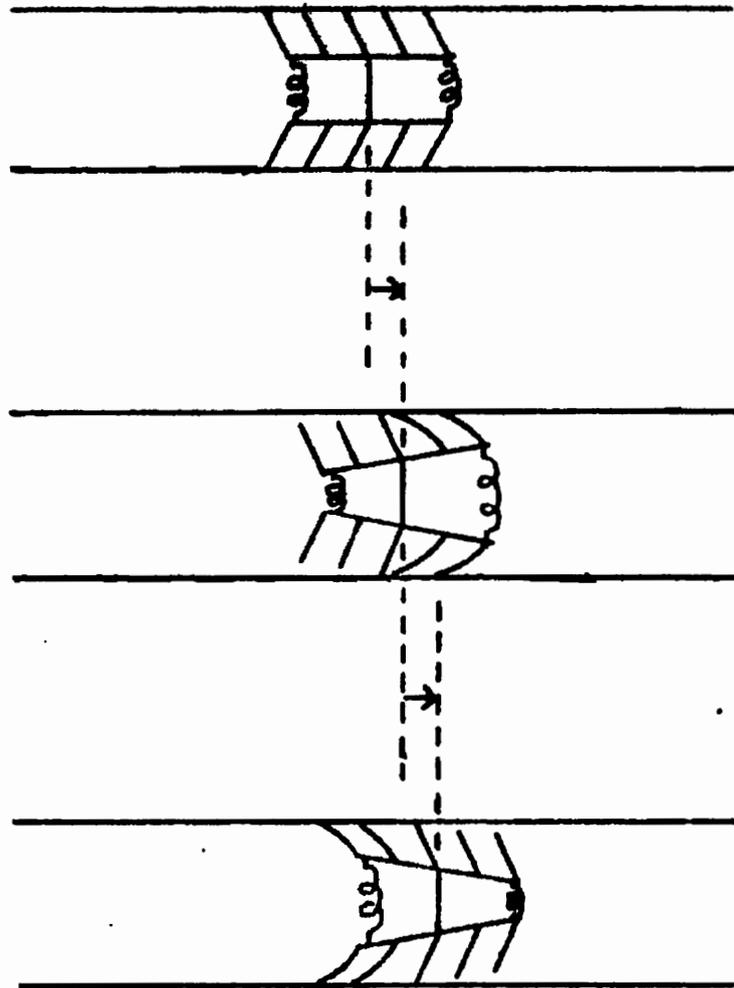


図 3.1: 毛のたわみ式移動

能である。移動体の自重は、約 3g、全長 55mm、アクチュエータ部分は、通常のコイルばねの内側に密着コイル型の形状記憶合金アクチュエータを入れた構造で、形状記憶合金に電流を通電させると、移動体全体が縮み、通電を止めると自然放熱させて温度を下げ、コイルばねの復元力によって移動体全体が伸びる。この伸縮を繰り返して移動体は1方向に移動する。

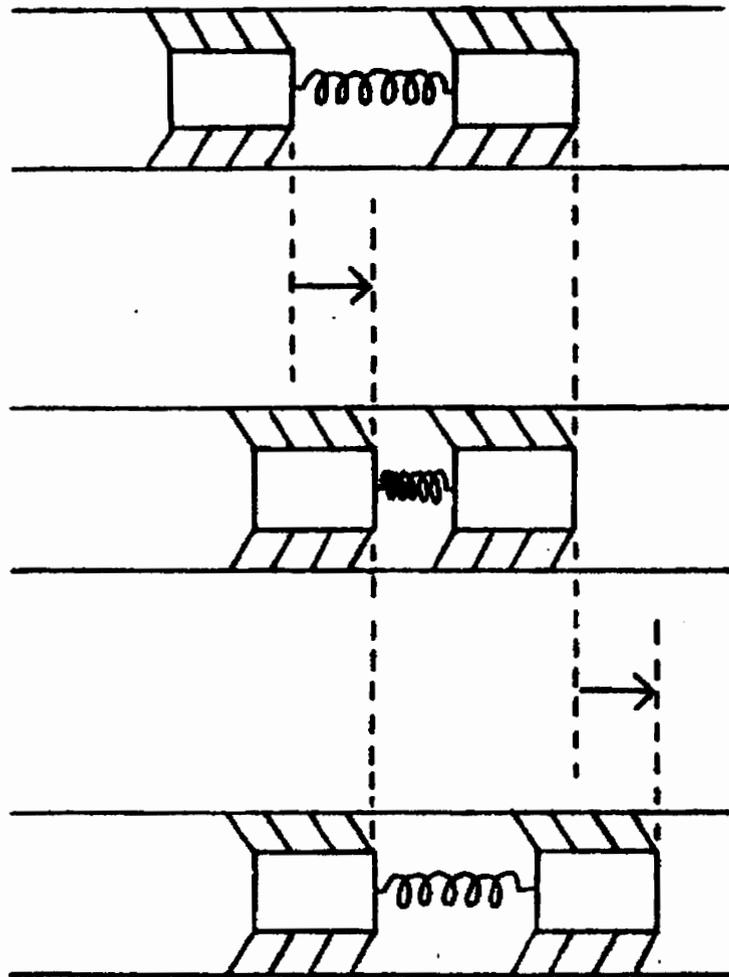


図 3.2: 尺取虫式移動

3.2.4 移動実験および考察

毛のたわみを利用した細管内移動体は、内径 19mm の透明のアクリル製細管内を移動するように製作したが、形状記憶合金の動作速度では、移動体の移動量および移動速度は大変小さかった。

尺取虫方式の細管内移動体は、通電として約 1.5A の電流を流したときで、移動速度は 0.7~1.0mm/min であった。実験において、自然放熱によって形状記憶合金が元の長さまで戻るまでの時間が 2 分から 3 分かかり、形状記憶合金による尺取虫方式移動には、形状記憶合金の動作速度と冷却に問題がある。この問題を解決するため

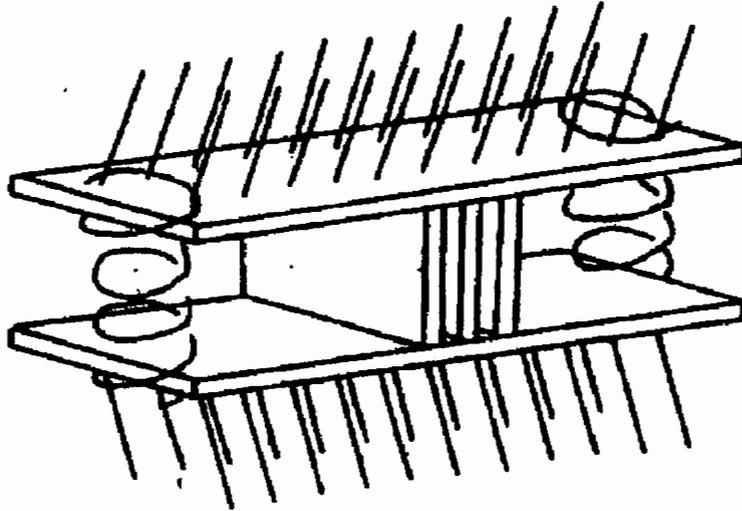


図 3.3: 毛虫型移動体の構造

には、使用する形状記憶合金は細い合金線を利用するか、冷却時間を早める工夫をする必要がある。

次に、冷却の効果を大きくし冷却時間を早める方法として、水冷の冷却による尺取虫方式を考案し移動実験を行った。この移動体の構造は、図3.4のコイルばねの部分シリコンゴムで覆い、内部に水を入れたものを製作した。製作した移動体に移動実験を行った。通電電流として2Aの電流を流したとき、移動速度は14~15mm/minで、自然放熱に比べて約10倍の移動速度を得られた。

これより、水冷冷却は有効な手段であることがわかり、これと形状記憶合金細線を組み合わせることにより細管内移動体の移動速度は速くなるのが可能となり、小型で単位重量当りのパワーの大きな移動体が期待できるが、この移動体では、移動中に水温が次第に上昇して、移動速度が徐々に小さくなっていったり、また、水が移動体から漏れて細管が濡れてしまうなどの問題が発生した。

3.2.5 考察

形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体は、毛のたわみを利用した移動方法や尺取虫方式を利用した移動方法について、

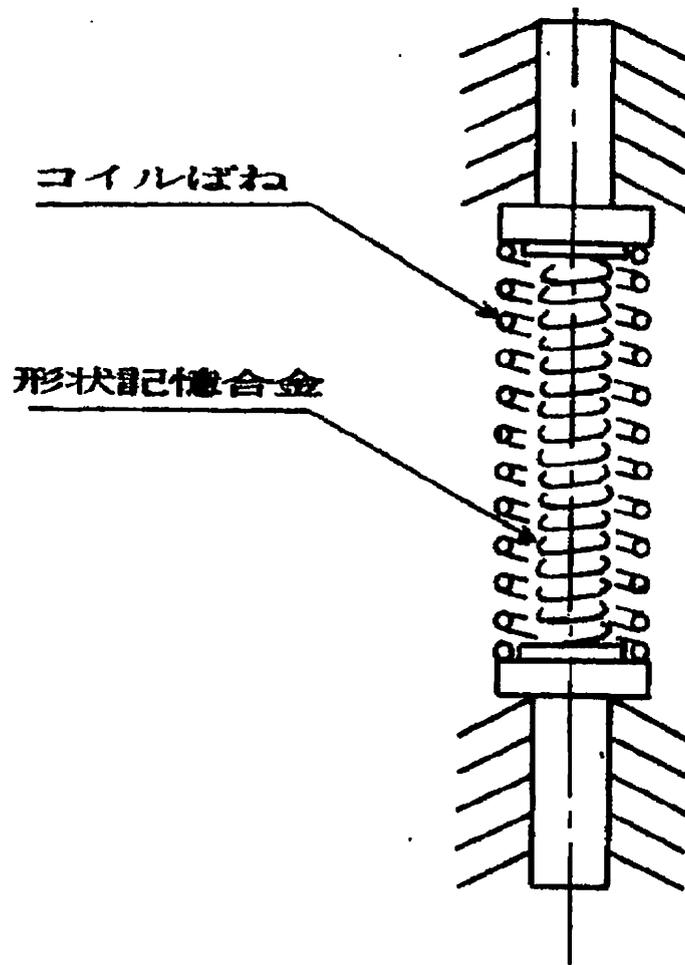


図 3.4: 尺取虫型移動体の構造

移動実験を行ってその結果を本論文に報告したが、形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体は、二つの方法とも動作速度に問題があり、形状記憶合金に通電したときの縮む動作は速いのであるが、伸びる速度は放熱に時間がかかり全体として動作速度は遅くなる。この放熱時の動作を早くさせることが移動速度に大きく影響を与え、伸縮時間が形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体の開発の大ききな課題となると思われる。

3.3 電磁力アクチュエータを用いた細管内移動体

3.3.1 電磁力アクチュエータによる移動方法

前節において、形状記憶合金を使用した細管内移動体について報告したが、その考察結果から、形状記憶合金アクチュエータを用いた細管内移動体はその動作速度に問題があり、的確な移動制御や移動速度を大きくするためには、移動体のアクチュエータ部分の伸縮の速度が大きいことが必要条件と考えられる。そのため、その伸縮速度を大きくするための方法として、電磁石の吸着を利用した電磁力アクチュエータによる細管内移動体を考案した [11]。

図 3.5 に、電磁力アクチュエータによる移動体の構造を示す。アクチュエータ部は、二つの鉄芯にエナメル線をコイル状に巻き付けて電磁石とし、鉄芯の間にコイルばねを入れて 3mm 程度の隙間を空けた構造になっている。コイル状のエナメル線に通電する電流を発振器により ON-OFF することで、電磁石の部分が伸び縮みし、図 3.5 の移動体は、弾性毛の角度によって移動方向が拘束されており、矢印の方向に移動する。ここで、コイルに流れる電流の大きさ

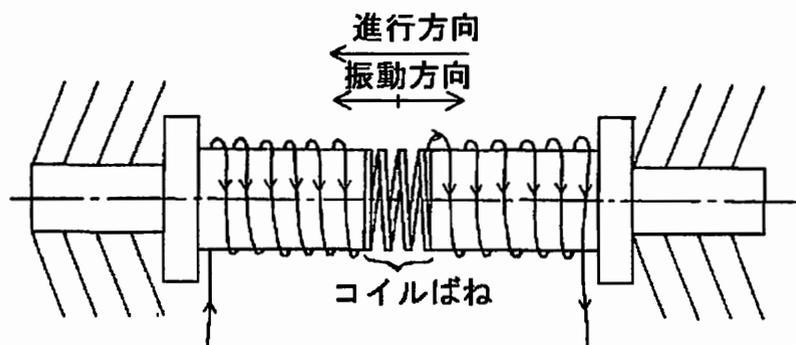


図 3.5: 電磁力アクチュエータを用いた細管内移動体

によって、磁界の強さ $H(\text{A/T})$ が決まることから、 $H(\text{A/T})$ を求める式は、

$$H = ni \quad (3.1)$$

となる。式 (3.1) の n は 1m 当たりの巻き数 (T/m)、 i はコイルに流れる電流 (A) を表す。

式(3.1)から、電磁力のパワーを大きくするためには、コイルの巻き回数を多くするか、コイルに流れる電流を多くすれば移動推力が大きくなるが、細管内の移動なので巻数には限度があり、そのためには、電流を多く流せばよいが、電流を多く流すと巻線に熱が発生し、その熱で移動体が触れないくらいに熱くなる。

3.3.2 電磁力アクチュエータを用いた1方向移動体

a. 電磁力アクチュエータによる1方向移動体の構造

電磁力アクチュエータを用いた1方向移動体を試作した。試作した移動体の大きさは、全長約9cm、自重10gf、鉄芯直径4mm、鉄芯の長さ2cm、コイルの巻数186回、電流1.5A、内径9mmのアクリルの透明細管の中を移動する。

b. 移動実験結果および考察

試作した移動体を使って移動実験を行った。通電電流をON-OFFする周波数を0から1kHzまで変化させて、その周波数での移動速度を計測した。その結果を図3.6に示す。周波数が120Hzのとき、最大速度122mm/sとなった。ここで移動体の固有振動数を求めてみると、

$$F = kx \quad (3.2)$$

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.3)$$

$$f = \frac{1}{t} \quad (3.4)$$

$$x = 1.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$F = 79.0 \text{ gf}$$

$$m = 10 \text{ gf}$$

上式から、 $k = 407.5\text{N/m}$ となり、したがって周波数 f は、 $f = 100.6\text{Hz}$ となった。つまり、移動体の固有振動数は100.6Hzであるが、この値は実験において、最大移動速度が得られた周波数とほぼ近い値である。このことは移動体が最大速度を得る周波数は共振周波数であると考えられる。このことから移動体が最大移動速度を得るには、移動体の自重を軽くして、ばね定数の値を大きくすれば良いことになる。

しかし、共振周波数による最大移動は、細管の傾斜角度や細管内壁面との摩擦係数、弾性毛の植え付け角度によっても共振周波数は変化するので、共振周波数を求めてから最大速度を得るのは効率的ではないと思われる。

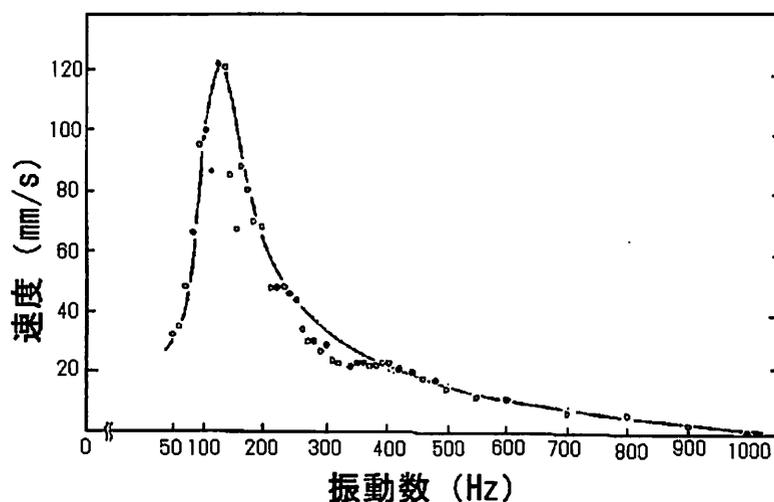


図 3.6: 振動数と移動速度の関係

3.3.3 電磁力アクチュエータを用いた2方向移動体

a. 電磁力アクチュエータによる2方向移動体の構造

電磁力アクチュエータを使って、前後進の2方向移動する移動体を製作した。この移動体は、移動推力のアクチュエータには電磁力を用い、移動体の方向を切り替えるために形状記憶合金を使った。その移動体の移動機構を図3.7に示す。図3.7をもとに実際に製作した移動体の大きさは、全長106mm、自重30gf、鉄芯直径6mm、鉄芯長さ20mm、コイルの巻数266回、電流1.5Aで、内径19mmの透明アクリル製細管の中を移動する構造である。b. 移動実験結果および考察

移動実験を行った結果、移動体が右方向への移動速度は4.3cm/sとなり、左方向への移動速度は5.5cm/sとなった。移動方向によって移動速度に多少の差があった。これは左右方向の移動中での細管内壁面と弾性毛との接触状態の違いによるものと推測される。また、

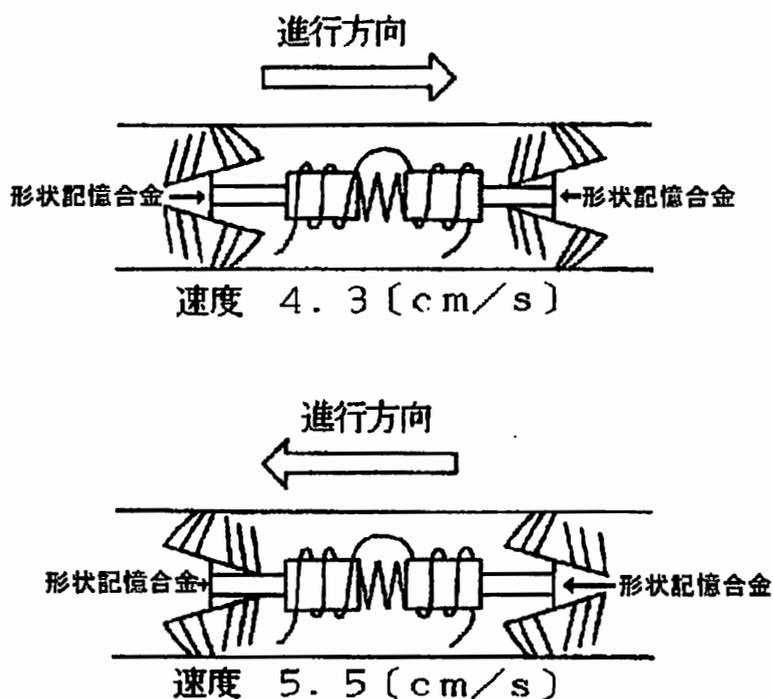


図 3.7: 電磁力アクチュエータによる 2 方向移動体の移動機構

移動方向を切り替える所要時間が 52.2 秒ほどかかり、方向転換も確実性に欠ける点があった。さらに、図 3.7 の移動体は、弾性毛の接触面積が小さく、保持力が小さいため水平な細管内以外は移動しなかった。

以上の実験考察から考えられることは、移動体を軽量化する必要があり、形状記憶合金の力を大きくして、弾性毛が植えてある板の角度を確実に傾かせ、細管内に強い保持力が持たせる必要があるとともに、移動方向の切り替えの動作速度を速くする必要がある。つまり、確実に 2 方向移動を行うためには、細管内壁面と弾性毛との接触部分に関することが最適なコントロールを行う課題となる。

3.3.4 電磁力アクチュエータ2個を用いた2方向移動体

前項までは、電磁力アクチュエータを1個使った移動体について考察を行ってきたが、アクチュエータを2個にすると、移動体のパワーも大きくなり、一方のアクチュエータと細管内の保持部が引っ掛かっても、他方のアクチュエータによって推力を2倍にして移動することが可能と考えられ、電磁力アクチュエータ2個を使った2方向移動体を検討した。さらに、以下に示すような改良を行った。

a. 2個の電磁力アクチュエータの位相差を変化させた。

2個の電磁力アクチュエータに対して、位相差の信号を同時に与え、位相差を変えることにより、移動体の移動速度が変化させた。

b. 電磁力アクチュエータの改良

アクチュエータ部分のコイルばねの直径を小さくし、ばね間隔を短くした。このようにすると電磁力の吸着力が増し、ある程度ばねの剛性を得ることができ、管軸方向への引っ張り力を強くすることができる。また、アクチュエータ部の長さが小さくなったので、細管が直管だけではなく、曲管に対する対応ができ曲がりやすくなり、直管から曲管への通過移動が可能となる。さらに、電磁石に使用するエナメル線の直径を0.32mmから0.2mmに替えて、巻数を180回から300回に大きくし、電磁力のパワーを大きくすることにした。そのため、通電電流を小さくし、細管内壁と接触する弾性毛の熱からの影響を少なくし、細管に対する熱の影響を抑えることとした。

c. アクリル材に植付けた弾性毛による保持部形状

図3.8に示すような、電磁力アクチュエータ2個とアクリルに弾性毛を植え付けた保持部を持つ移動体を製作した。図3.8の大きさは、全長12mm、直径9mmで、自重は14.5gfである。電磁力アクチュエータに与える電流は1.4A、印加電圧 $50V_{p-p}$ の正弦波パルスを与えた。2個のアクチュエータに0から 360° までの位相差を与えて、その移動速度を測定した。その結果を図3.9に示す。図3.9は、縦軸は移動速度(mm/s)、横軸は位相差($^\circ$)を表す。図3.9から、 60° 、 140° 、 220° 、 280° の位相差のとき、移動速度が大きくなった。また、これらのピークはほぼ 90° ずつずれている。移動体は位相差が 180° のとき、もっとも移動速度が大きくなると思われるが、実際に測定した値は、4個もの最大速度のピークが現れている。この異なった結果に対しては、今後検討する必要があると思われる。

d. アクチュエータ2個とシリコンと弾性毛の保持部

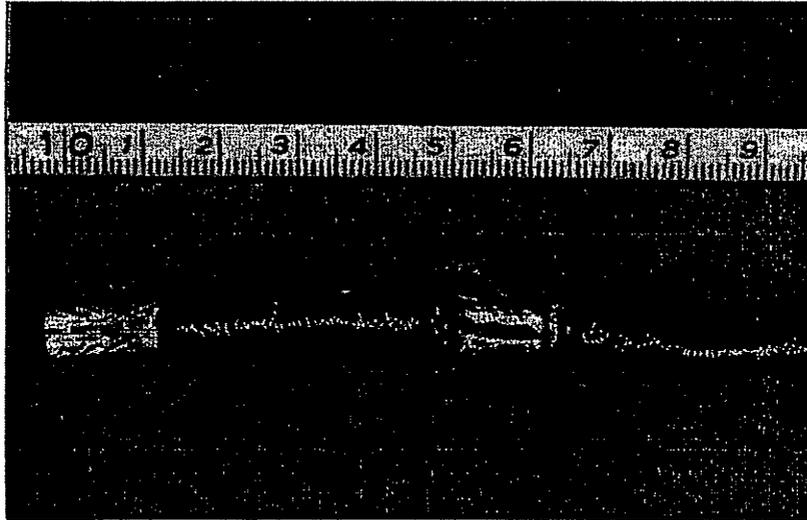


図 3.8: 電磁力アクチュエータ 2 個による移動体 (保持部: アクリル+弾性毛)

アクチュエータ 2 個とシリコンと弾性毛の保持部に変更した移動体の構造を図 3.10 に示す。移動体の大きさは、全長 120mm, 直径 9mm であり、移動体の自重は 14.2gf である。図 3.10 の移動体について、位相差による移動実験を行った。その結果を図 3.11 に表す。実験方法は、アクリルと弾性毛と同じ実験方法で行ったが、保持部をアクリルと弾性毛にしたときの位相差が 60° 及び 210° では前進ではなく後進している。このことについては、原因はわかっていないが、位相差によっては後進するような推力が働いていることになる。

また、保持部をシリコンと弾性毛にすると、細管内壁との摩擦力が増し、垂直上昇が可能となった。

3.3.5 保持部の改良について

a. 電磁力アクチュエータの保持部について

前項の研究は、電磁力アクチュエータの保持部をアクリルと弾性毛およびシリコンと弾性毛の組み合わせで実験を行ってきたが、実験中の熱の発生により、弾性毛の豚毛が変化を起し安定走行ができ

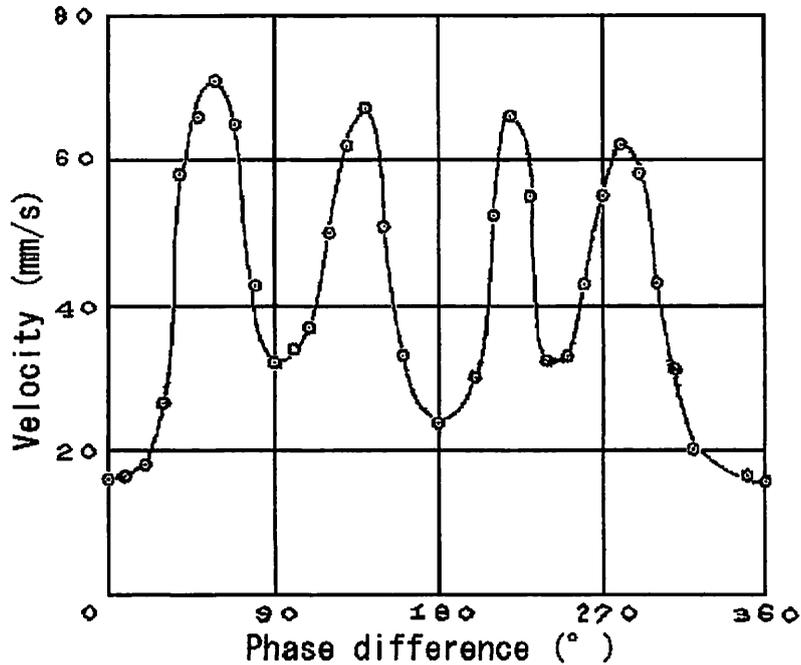


図 3.9: 位相差と移動速度の関係

ないことがあり、本項では、この点を改良するために、熱に強い、シリコン一体型の保持部について、考察を行った。

本項で考案した保持部の基本となる形について、その形から、鋸波型とそれを改良したピラミッド型で、実際にこの形の保持部を製作して、移動実験を行った。

b. 鋸波型保持部の電磁力アクチュエータについて

図 3.12 の鋸波型保持部を考案した理由については、細管の壁面に対して、接触面積を少なくするためであり、接触面積が大きいと保持力が多き過ぎて摩擦力が大きくなり、移動することが困難になることや、電磁力の振動がシリコンゴムに吸収されてしまうことを考慮した。製作した鋸波型保持部の電磁力アクチュエータの移動体の大きさは、全長 130mm、外径 9mm、自重は 15.8gf である。

ここで、鋸波型保持部の移動体の印加周波数の移動特性を調べるため、印加周波数と位相差との関係を調べてみた。実験において、印加周波数を 40Hz にしたときの位相差の変化について実験を行った。その結果を図 3.13 に示す。縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は位相差 (°) を表す。その結果を比較してみると、40Hz では、最大速

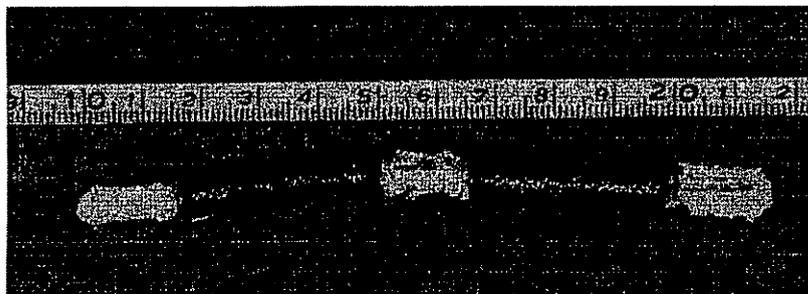


図 3.10: 電磁力アクチュエータ 2 個による移動体 (保持部：シリコン+弾性毛)

度のピークが四つ、周期的 (90° 間隔) に、振幅においてもほぼ一定となって現れた。図 3.13 での最高速度は位相差が 120° のときで、 90.9mm/s であった。

c. ピラミッド型保持部の電磁力アクチュエータについて

前項において、シリコンと弾性毛の保持部において、位相差を変化させることにより、1方向だけではなく、2方向移動が見られたが、図 3.14 のピラミッド型保持部はその形状から方向性は持たないので、ピラミッド型保持部を持つ移動体の 2 個のアクチュエータに、位相差を与えた場合に、移動体が 2 方向移動する現象が見られた場合、これは位相差信号による 2 方向移動が行われていることになる。このことを確かめるために、以下の実験を行った。

・ピラミッド型保持部の位相差と移動速度の関係

細管を水平にして、印加周波数を 40Hz にして、位相差を 0 から 360° まで変化させて、その移動速度を測定した。その結果を図 3.15 に示す。その結果移動速度は、ほぼ 90° 間隔で前進と後進が切り替わっているのがわかる。この結果から、移動体を前後進の 2 方向移動させるのは、2 個のアクチュエータの位相差によっても移動が可能であることがわかる。このことは、移動体に移動方向の切替機構無しに、2 個のアクチュエータの位相差を切り替えるだけで、移動体の移動方向が切り替わりことになり、移動体の構造は簡単化されることになる。

・鋸波型保持部とピラミッド型保持部の比較

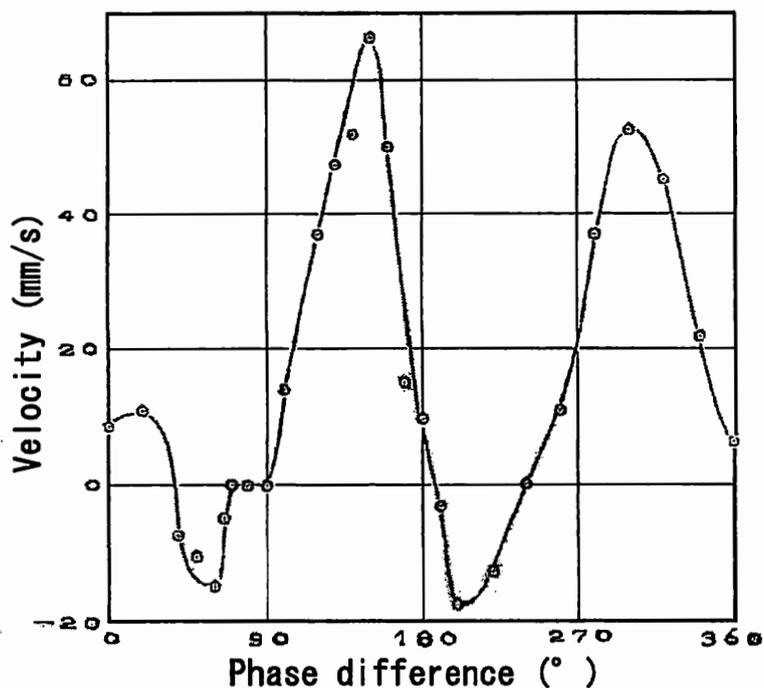


図 3.11: 位相差と移動速度の関係

細管を水平にして、印加周波数を 40Hz にして、鋸波型保持部及びピラミッド型保持部の移動体に位相差を 0 から 360° まで変化させて、その移動速度を測定した実験結果の比較を行った。その結果を図 3.16 に示す。図 3.16 から、保持部の形状によって移動方向性が顕著に現れ、ピラミッド型保持部の移動体が後進している位相差において、鋸波型保持部の移動体では前進している。これは鋸波型形状では移動方向性が決まっているのに対して、ピラミッド型形状では移動方向性が決まっているのではなく、位相差信号によって移動体の方向を決めていることになる。

3.3.6 考察

電磁力アクチュエータによる細管内移動体の移動実験を行った結果、実験では、細管内を移動するために、製品化されている電磁石を使わずに、実際に手巻きによる電磁石の製作のため、精度よく巻くことができず、コイルの巻き方にばらつきができ、必ずしも効率の良い電磁力を得ることはできなかった。そのため、必要以上に電

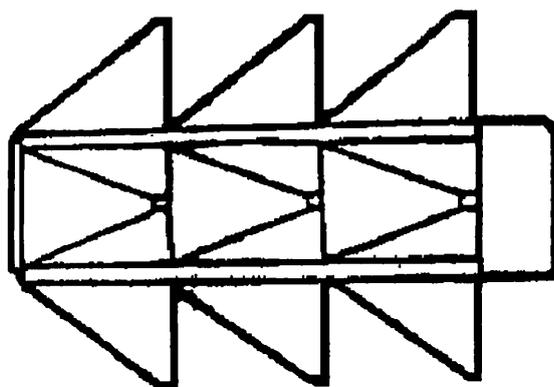


図 3.12: 鋸波型保持部の形状

流が流れてしまい、移動体に通電するたびに熱が発生し、実験に使用した透明の亚克力細管の中の壁面が焼けてしまい、細管の内面が白く濁ったような状態となった。また、電流が多く流れているため、移動体本体が触れない位熱くなり、これらの問題を解決しないと実際に実用化するのは困難と考えられる。

3.4 圧電アクチュエータを用いた細管内移動体

3.4.1 黄銅板付移動体の移動実験

本研究で検討した移動体の基本となる構造を図 3.17 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 40kHz)の振動部分に使われているものを用いた。大きさは直径 7mm, 厚さ 0.4mm の金属円板に、一辺が 4.5mm, 厚さ 0.1mm 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。図 3.17 で, 1, 2 は長さがそれぞれ約 3mm および約 2.5mm, 幅が約 1mm, 厚さが約 0.03mm の黄銅板で, 図 3.17 のように変形させて外面を半田で薄くぬった。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, 円管の内壁を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。この移動体の自重は 0.12gf であり, また, エナメル線まで含めると, 0.4gf となる。

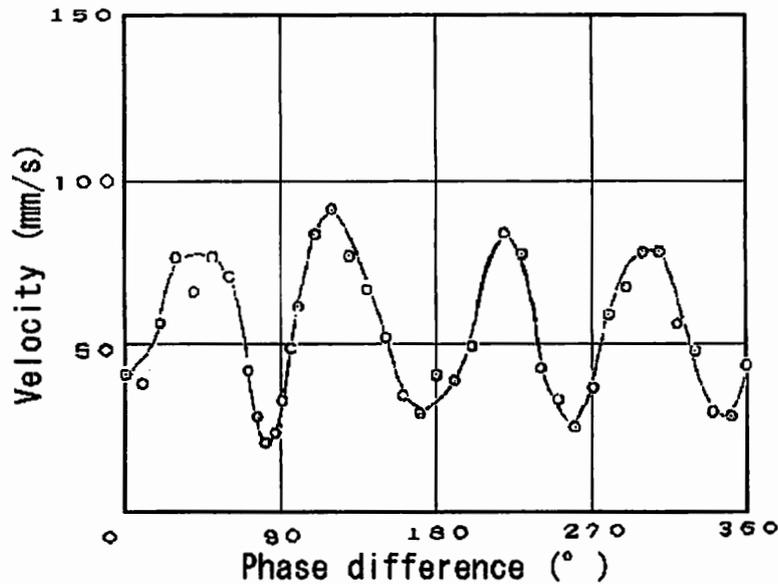


図 3.13: 位相差と移動速度の関係

圧電アクチュエータに印加する電圧は方形波電圧とし、印加電圧を与えるとアクチュエータはバイモルフ振動し [12]、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 3.18 の破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細管の内壁を小さくたたきながら、移動体は図 3.18 の矢印の方向に移動する。なおこの実験で使用した細管は内径 11mm の透明アクリルのパイプである。また、移動体に接続してあるエナメル線は、実験で細管内を移動中のときは、すべて 1 方向に引き出して行った。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。次に、図 3.18 の移動体について、基本的な移動特性について実験を行い、さらに種々の構造の移動体を製作して移動実験を行って、その移動特性を調べた。

a. 印加電圧と移動速度の関係

細管を垂直に固定して、印加周波数を 46.5kHz にし、印加電圧を 10 ~ 40V まで変化させて移動体の上昇速度を求めた。その実験結果を図 3.19 に示す。図 3.19 の縦軸は上昇速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。図 3.19 のグラフはそれぞれの印加電圧において、実験を 3 回繰り返して、その平均値を示したものであり、データのば

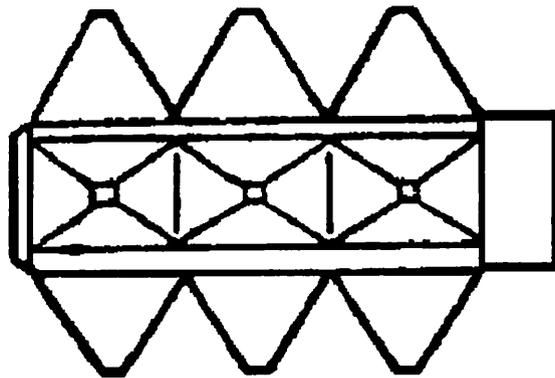


図 3.14: ピラミッド型保持部の形状

らつきは、各速度で最大約±7mm/s以内である。以後の実験結果においても、同様のばらつき程度であった。このように実験点がばらつくのは、薄い黄銅板と細管内壁との接触のしかたが微妙に異なり、接触のしかたに違いが表れると、それが速度のばらつきに影響するのではないと考えられる。また、この実験において印加電圧を大きくすると上昇速度が大きくなるのではなく、移動体が最大速度になる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考えられる。

b. 印加周波数と移動速度の関係

細管の傾斜角度を 0° 、 30° 、 60° 、 90° に設定し、印加電圧を $12V_{p-p}$ に固定し、印加周波数を46~49kHzに変化させて、それぞれの傾斜角度における移動速度を求めた。その結果を図3.20に示す。図3.20は縦軸が移動速度(mm/s)、横軸が印加周波数(kHz)を表す。図中、■印で示したものは、細管を垂直にした場合の上昇速度であり、図3.20から、47~47.5kHz付近において、移動速度が最大となった。

3.4.2 りん青銅板付移動体の移動実験

a. りん青銅板付移動体の実験方法

黄銅版の変わりに、長さが約3.5mm、幅約1.5mm、厚さ0.1mmのりん青銅板を使って、移動体の構造を若干変更して実験を行った。移動体は、細管内壁よりも大きくし、両側のりん青銅板間の距離を

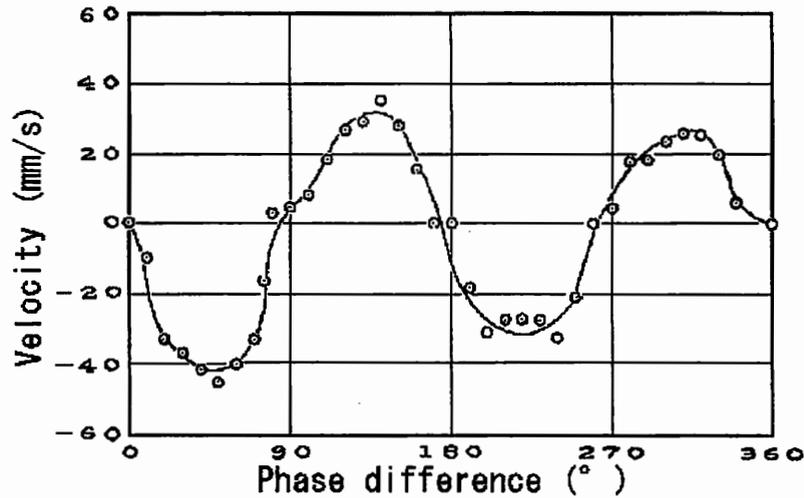


図 3.15: 位相差と移動速度の関係

12mmにした。このため図 3.18 の移動体とは異なって、図 3.21 のように、細管内に移動体を傾けた状態にして移動させた。

b. 印加電圧と移動速度の関係

実験は、細管を垂直にして印加周波数を 40kHz とし、印加電圧を 5 ~ 45V_{p-p} 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 3.22 に示す。図 3.22 は、縦軸は印加電圧 (V_{p-p}) を、横軸は上昇速度 (mm/s) を表す。図 3.22 の実験結果から、上昇の最大速度は、40V_{p-p} で約 308mm/s となった。

3.4.3 圧電アクチュエータ 2 個による 2 方向移動体

a. アクチュエータを 2 個による 2 方向移動体の構造

図 3.23 において示した黄銅板付移動体を 2 個使って、前進および後進の 2 方向に移動できる移動体を製作して、その移動体の移動実験を行った。始めに移動体の構造を図 3.23 に示す。図 3.23 は移動体をお互いに反対向きにして接続したもので、二つのアクチュエータがお互いに振動が伝わらないように、間に円筒のゴムを入れてある。その吸振用のゴムの大きさは、外径が 2.3mm、長さ約 6mm で、

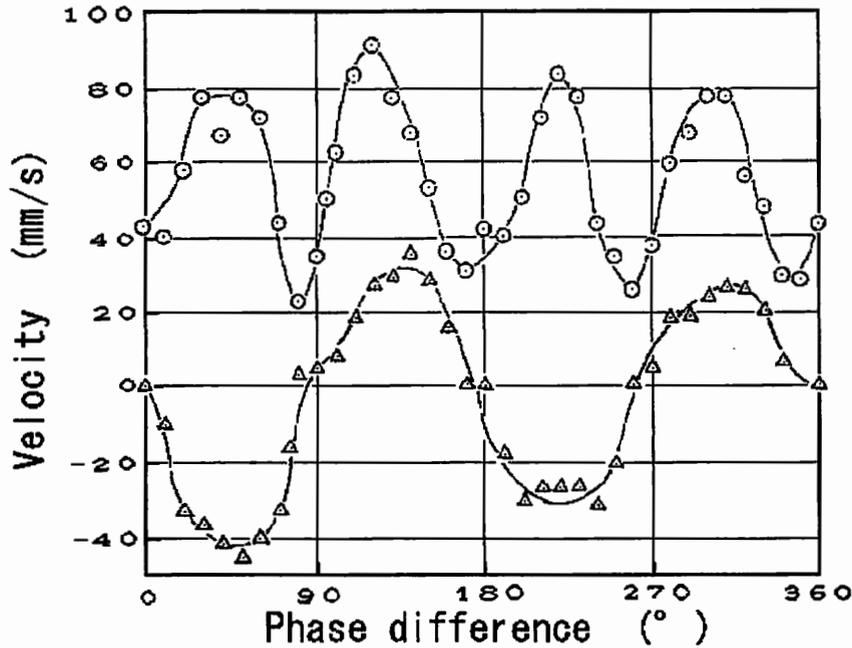


図 3.16: 鋸波型 (○印) とピラミッド型 (△印) 保持部の比較

両側から連結金具 2 で止めてある。図 3.23 の移動体の自重は 0.28gf である。

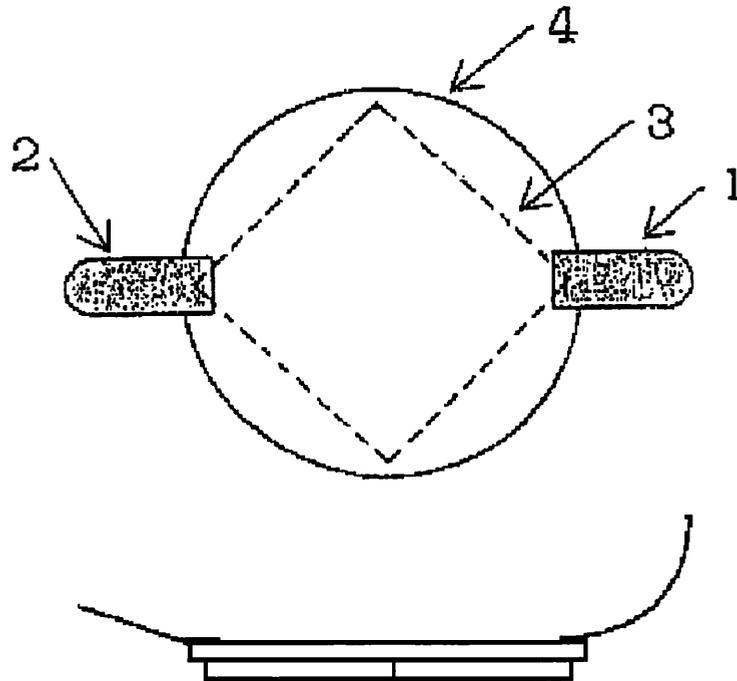
b.2 方向移動体の移動方法

図 3.23 の移動体の移動方法は、両側のアクチュエータを同時に振動させて、黄銅板の先端と細管内壁との摩擦を振動により軽減する。また、2 個のアクチュエータはお互いに違う印加周波数を与え、その違う周波数から前進または後進させる。前進のときの印加周波数は前側アクチュエータに 43.5kHz、後側アクチュエータに 39.5kHz を与え、また、後進の場合は、後側アクチュエータに 43.0kHz、前側アクチュエータに 38.0kHz を与える。

c.2 方向移動体の移動実験と結果

実験方法は、細管を水平位置から 10° 間隔で傾斜させて、垂直位置までの 2 方向の移動速度を求める。その前進と後進の実験結果を図 3.24 に示す。印加電圧は 12V_{p-p} とした。図 3.24 の縦軸は移動速度 (V_{p-p})、横軸は傾斜角度 (°) を表す。

図 3.24 の後進 (△印) において、傾斜角 90° 付近であれば、エナメル



- 1 : brass plate A
- 2 : brass plate B
- 3 : Piezoelectric actuator
- 4 : Metal disk

図 3.17: 黄銅板付移動体の構造

線と内壁との接触による摩擦が小さくなって、降下速度が速くなったと考えられる。

3.4.4 圧電アクチュエータ 1 個による 2 方向移動体

a. アクチュエータを 1 個による 2 方向移動体の構造

図 3.25 に、アクチュエータを 1 個による 2 方向移動体の構造を示す。圧電素子の付いている面の反対側に長さ 17mm で、幅約 1.3mm、厚さ 0.1mm 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) を取り付けてある。図 3.25 に示すように保持板は、細

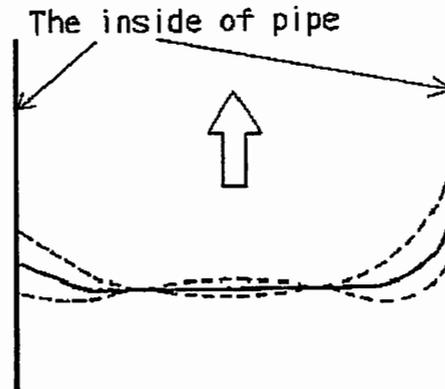


図 3.18: 移動体の屈曲振動

管に挿入しないときには，AB の状態であり，挿入すると AC の状態になり，保持板は D で接触する．移動体は保持板の弾性力によって後ろから押されて，細管内壁に接触して二つのりん青銅板は強く内壁に当たるようになり，移動体と内壁の接触圧はより強くなる．図 3.25 の移動体の保持板を含めた自重は，0.13gf となる．

b. 印加電圧と上昇速度の関係

細管を垂直に固定して，印加周波数を 40kHz とし，印加電圧を 10～45 V_{p-p} まで変化させて上昇速度を求めた．その実験結果を図 3.26 に示す．図 3.26 は，縦軸は上昇速度 (mm/s)，横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す．図 3.26 から，最大上昇速度は 40 V_{p-p} 付近で，264mm/s となった．

d. 印加電圧と水平および上下移動

細管を水平および垂直にして，保持板付移動体について実験を行った．印加電圧を 5～40 V_{p-p} まで変化させて，水平と上下の 2 方向の移動速度を求めた．印加周波数は 41.5kHz と固定した．その結果を図 3.27 に示す．図 3.27 は縦軸は速度 (mm/s)，横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す．図 3.27 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_{p-p} を境にして，それ以下の印加電圧では後進し，それ以上の印加電圧では前進した．また，上下移動も (△印) では，印加電圧約 12 V_{p-p} を境にして，それ以下の印加電圧では降下し，それ以上の印加電圧では上昇した [50]．

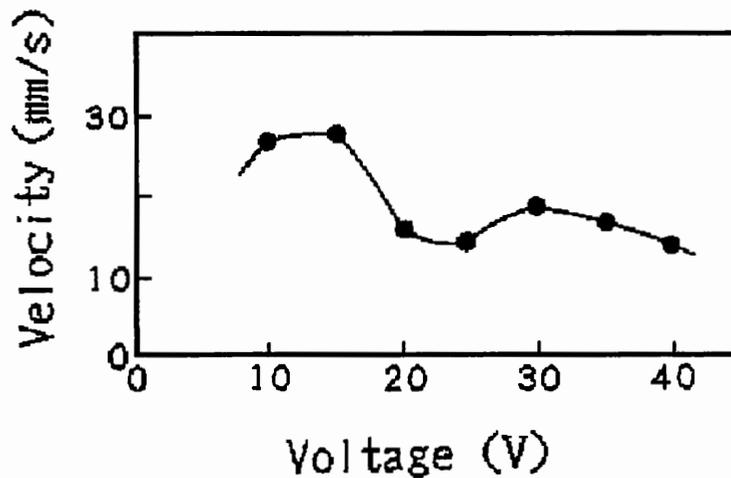


図 3.19: 印加電圧と移動速度の関係

3.4.5 改良型2方向移動体

前項において、2個の圧電アクチュエータを交互に加振させて、移動体を前後進させる方法や移動体に保持板を付けて印加電圧を変化させて前後進させる方法により、移動体を前後進の2方向移動させる移動体について報告したが、本項では、圧電アクチュエータの印加周波数を変化させて移動する移動体について報告する。

a. 改良型2方向移動体の構造

改良した移動体の構造について図 3.28 に示す。図 3.28 は、内径 11mm の透明アクリル細管内を移動する移動体で、移動体の大きさと寸法が示してある。

移動体のアクチュエータ部分には、超音波センサ (村田製作所製, MA40S2S) の振動部分に使われているものを使用し、図 3.28 の 2, 3 は、大きさが直径 7mm, 厚さ 0.4mm の金属円板に、一辺が 4.5mm, 厚さが 0.1mm の正方形のバイモルフ構造をした圧電素子が接着されている。図 3.28 のりん青銅板 1, 6 は長さがそれぞれ約 2.85mm および約 2.75mm, 幅が両方とも約 1.8mm, 厚さが約 0.1mm あり、図 3.28 のように 27° および 38° に傾けて金属円板に半田付けしてある。図 3.28 のりん青銅板 4, 7 は、移動をスムーズにするための補助板で、両方とも大きさは、長さ約 1.45mm, 幅は約 1.1mm, 厚

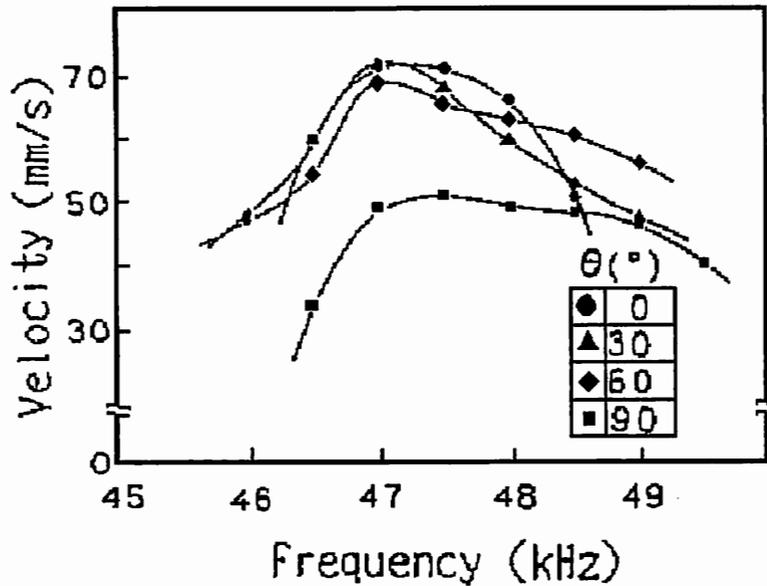


図 3.20: 印加周波数と移動速度の関係

さは約 0.1mm であり、金属円板に半田付けしてある。図 3.28 のりん青銅板 1, 4, 6, 7 の先端は、1, 6 が半径約 0.9mm, 4, 7 は半径約 0.5mm の半円で、細管内を移動しやすくするためと細管内壁面の接触部分をなるべく少なくするためにすべて丸く削ってある。また、移動体の自重を大きくするために、直径約 2.5mm 程度の半円球の半田の塊を半田付けしてある。金属円板と圧電素子にエナメル線を半田付けして、エナメル線を通して印加電圧を与える。なお、移動体の自重は約 0.15gf である。

b. 改良型 2 方向移動体の移動方法

移動体を移動させるときは、図 3.30 のように、管軸の垂直方向から約 ± 5 以内に保つ程度で 26° 斜めに傾けてセットし、細管内壁面に図 3.28 のりん青銅板 1, 6 を接触させる。圧電素子にデューティ比が 50% の方形波パルスの電圧を印加すると、バイモルフ振動を起こし、図 3.29 のように、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となり、移動体全体が屈曲振動をする。この屈曲振動により、図 3.28 の 1, 6 のりん青銅板の先端が、細管内壁面に加圧の強弱を繰返しながら移動する。なお移動実験時は、エナメル線はすべて図 3.30 の後進方向側から引き出しており、そのため移動体が

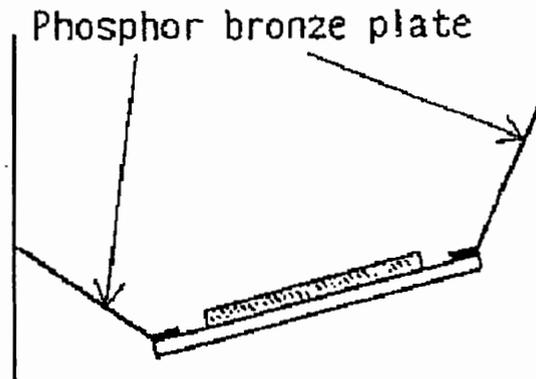


図 3.21: りん青銅板付移動体の移動

前進するときには，エナメル線を引ながら移動することになる。

c. 改良型2方向移動体の移動実験と結果

・印加周波数と水平移動速度の関係

細管を水平に固定させ，印加電圧を $35V_{p-p}$ とし，印加周波数を変化させて，図 3.28 の移動体の移動速度を求めた。その実験結果を図 3.31 に示す。図 3.31 の縦軸は移動速度 (mm/s)，横軸は印加周波数 (kHz) を表す。図 3.31 のグラフは，各測定点において3回計測し，その3点の平均値をプロットして，実線で繋いだものであり，図 3.31 から，印加周波数の変化により，移動体が前後進しているのがわかり，前進の最大速度は 51kHz の印加周波数で 119.1mm/s であり，後進の最大速度は 21kHz の印加周波数で 67.6mm/s となった。この実験では，前進の最大速度のほうが，後進の最大速度より速い結果となった。

・印加電圧と水平移動速度の関係

細管を水平に固定させ，印加電圧を $15\sim 45V_{p-p}$ まで変化させて，移動体の前後移動速度を求めた。その結果を図 3.32 に示す。図 3.32 は，前進は◆印を表し，印加周波数を 51kHz とし，後進は■印で表し，印加周波数 21kHz として測定した。図 3.32 の縦軸は移動速度 (mm/s)，横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。図 3.32 から，前後進とも印加電圧を大きくすると移動速度が速くなるという結果となり，したがって移動速度は，印加電圧の大きさを変えることにより，コントロールが可能となる。

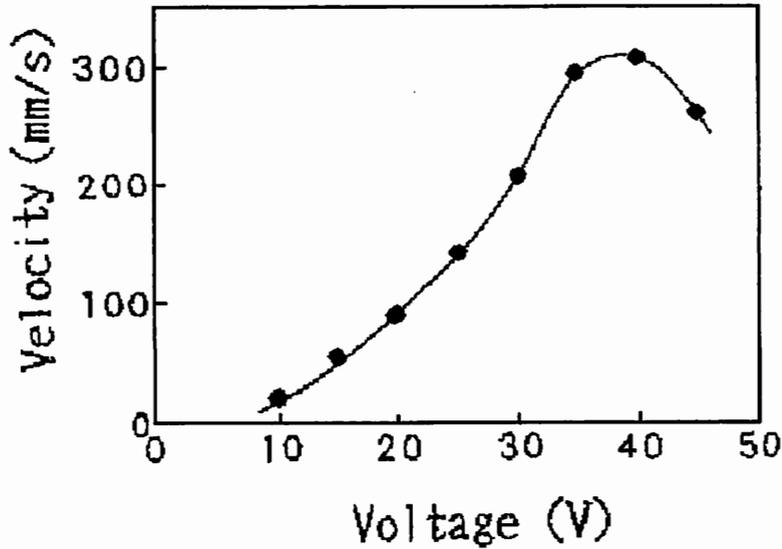


図 3.22: 印加電圧と移動速度の関係

d.90 曲管内の移動

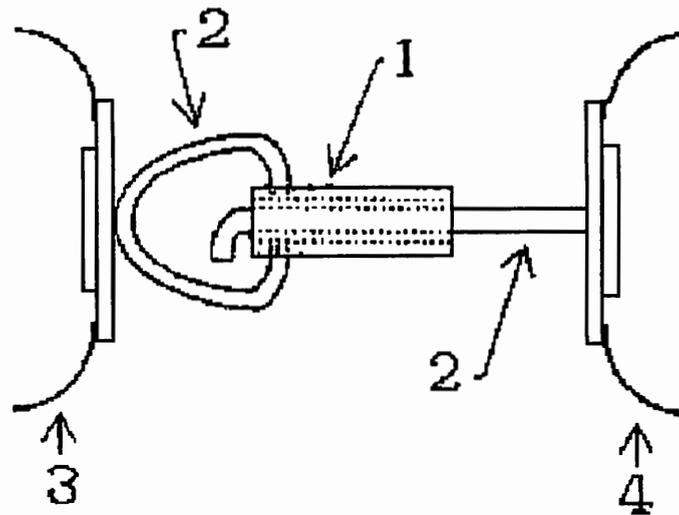
直管内の移動だけではなく、 90° に曲がった内径 11mm の透明アクリル曲管内の移動についても実験を行った。その結果を次に報告する。

・印加周波数と移動速度の関係

90° 曲管を水平に置いて、曲管内を通過する速度を測定する実験を行った。印加電圧を $35V_{p-p}$ にして、印加周波数を変化させて前後進の実験を行い、その結果を前進は図 3.33 の (a) に、後進は図 3.33 の (b) に示す。図 3.33(a), (b) とともに縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加周波数 (kHz) を表す。前進は、印加周波数を 51.5~54kHz まで変化させて測定し、後進は印加周波数を 20.5~21.5kHz まで変化させて測定した。図 3.33(a) から、前進の最大速度は印加周波数 52kHz で 72.41mm/s となり、図 3.33(b) から、後進の最大速度は、印加周波数が 21kHz で 61.17mm/s となった。

・印加電圧と移動速度の関係

90° 曲管を水平に置いて、印加電圧と移動速度の関係を調べた。前進の印加周波数を 52kHz とし、後進の印加周波数は 21kHz とし、印加電圧を 25~45 V_{p-p} まで変化させて前後進の移動速度を測定した。その結果を図 3.34 に示す。図 3.34 は縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表し、前進は◆印、後進は■印で表す。図



- 1 : Rubber
- 2 : Connecting fitting
- 3 : Front side actuator
- 4 : Back side actuator

図 3.23: 圧電アクチュエータ 2 個による 2 方向移動体の構造

3.34 から、印加電圧を大きくすると、前後進の速度は比例的に大きくなる傾向となった。

e. 水平移動から上下移動

・印加周波数と上下移動速度の関係

90° 曲管を使用して、曲管内を水平位置から曲部内を通して垂直に上下移動できるように設置して、移動体を上昇および降下させて、印加周波数と移動速度の関係を調べた。印加電圧を $35V_{p-p}$ として、上昇は印加周波数を 49.5~50.5kHz に変化させて、曲部の上昇速度測定し、降下は、印加周波数を 20.5~22.5kHz に変化させて降下速度を測定した。その結果、上昇速度を図 3.35(a) に、降下速度を図 3.35(b) に示す。図 3.35(a), (a) とも、縦軸を移動速度 (mm/s)、横軸を印加周波数 (kHz) を表す。図 3.35(a) から、上昇の最大速度は 50.5kHz で 52.5mm/s、図 3.35(b) から、降下の最大速度は 50.5kHz で 52.5mm/s となった。

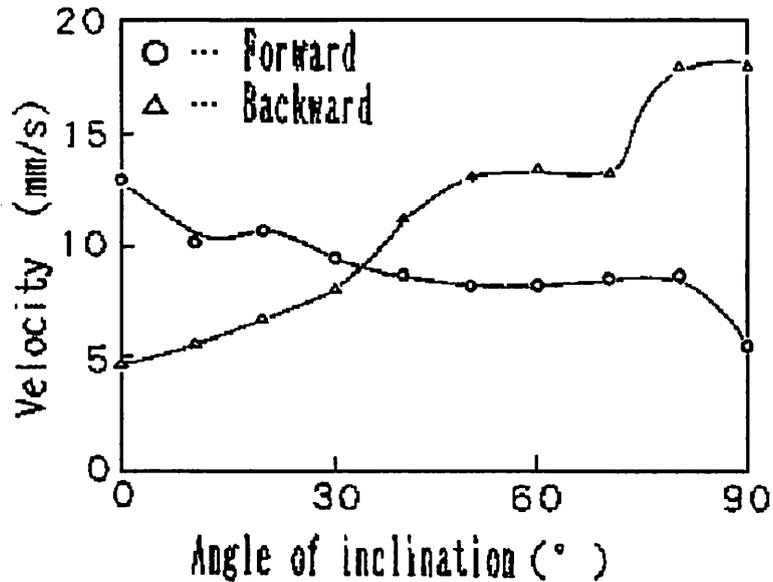


図 3.24: 印加電圧と移動速度の関係

・印加電圧と移動速度の関係

上昇の印加周波数を 50.5kHz, 降下の印加周波数を 21kHz にして, 印加電圧を 25~45 V_{p-p} まで変化させて, 上昇および降下速度を測定した. その結果を図 3.36 に示す. 図 3.36 は, 縦軸を移動速度 (mm/s), 横軸を印加電圧 (V_{p-p}) を表す. また, 上昇は◆印, 降下は■印で表す. 図 3.36 から, 印加電圧を大きくしていくと, 上昇および降下速度は大きくなる結果となったが, 降下速度のほうが, 上昇速度よりも大きいのは, 降下時に下降方向に重力が加わったのではないかと考えられる.

3.4.6 内径 4mm の細管内を移動する移動体

a. 内径 4mm の細管内移動体の構造

内径 11mm の細管内を移動する移動体の構造は, 圧電素子で屈曲振動を起こさせて振動でりん青銅板を振動させ, その振動を細管内壁面に伝達させて移動する構造であり, この圧電素子の振動部分を小

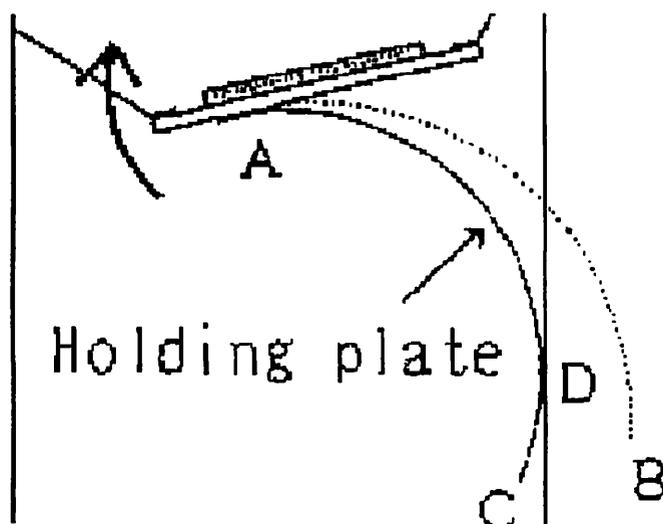


図 3.25: 2方向移動体の構造

さくすれば、さらに細い細管内を移動することも可能であると考え、二つの小さい圧電素子を用いて、屈曲振動を起こす扇状の形にする構造を考案し、さらに細い内径4mmの細管内を移動する移動体の製作を行った。扇状にすることによって、振動の振幅をできるだけ大きくすることができると考え、また試作を行って前後移動が確認できたことや、扇の開く角度を変えることによって、細管内径の変化に対して柔軟に対応できるのではないかと考えた構造を図3.37に示す。図3.37で使った圧電アクチュエータの大きさは長さが10mm、幅2mm、厚さ0.53mmであり、バイモルフ型の振動をする。この二つの圧電アクチュエータを 10° の角度で扇状の形にして合わさったところを接着する。圧電素子の先端には厚さ0.1mmのりん青銅板を接着した。図3.37のりん青銅板Aは長さ約3mm、幅約2mmの大きさに圧電アクチュエータの延長方向に接着し、りん青銅板Bは、長さ2mm、幅約2mmで、圧電アクチュエータとの角度が 60° となるように接着した。いずれのりん青銅板の先端も丸く削ってある。二つの圧電アクチュエータにはそれぞれエナメル線が半田付けされてある。なお、移動体の自重は0.17gfである。

b. 内径4mmの細管内移動体の移動方法

図3.37の移動体の移動方法は、圧電アクチュエータに印加する電圧は方形波電圧とし、圧電アクチュエータに印加電圧を与えると、圧

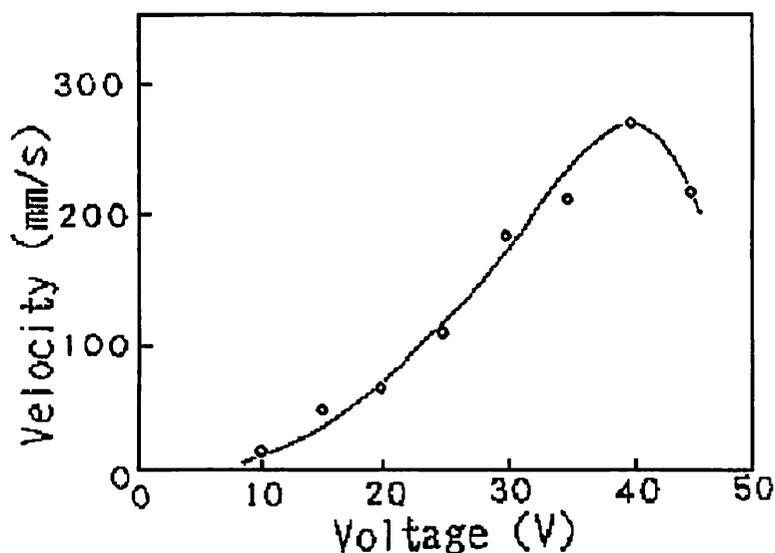


図 3.26: 印加電圧と上昇速度の関係

電アクチュエータはバイモルフ振動を起こし、りん青銅板の先端が細管内壁に振動を伝達させ、推力を得ながら前後進する。

ここで、移動方向は両側の圧電アクチュエータが開いている方向に移動するのを前進または上昇とし、接着している方向を後進または降下とする。実験中は、エナメル線を後進方向に引き出して、移動体はエナメル線を引きながら前進または後進する。

c. 内径 4mm の細管内移動体の移動実験

・印加周波数と水平移動速度の関係

内径 4mm の細管を水平に固定して、印加電圧を $40V_{p-p}$ にして、印加周波数 16~19kHz まで変化させて、前後進の移動速度を求めた。その結果を図 3.38 に示す。図 3.38 は縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加周波数 (kHz) を表す。前進は■印で表し、最大速度は 18kHz で 6.4mm/s となり、後進は◆印で表し、最大速度は 17kHz で 9.2mm/s となった。これはエナメル線を引きながら移動するという負荷が前進速度を低く抑えているのではと思われる。

・印加周波数と上下速度の関係

内径 4mm の細管を垂直に固定して、移動体の上下移動速度の実験を行った。印加電圧を $40V_{p-p}$ にして、印加周波数を 15~20kHz ま

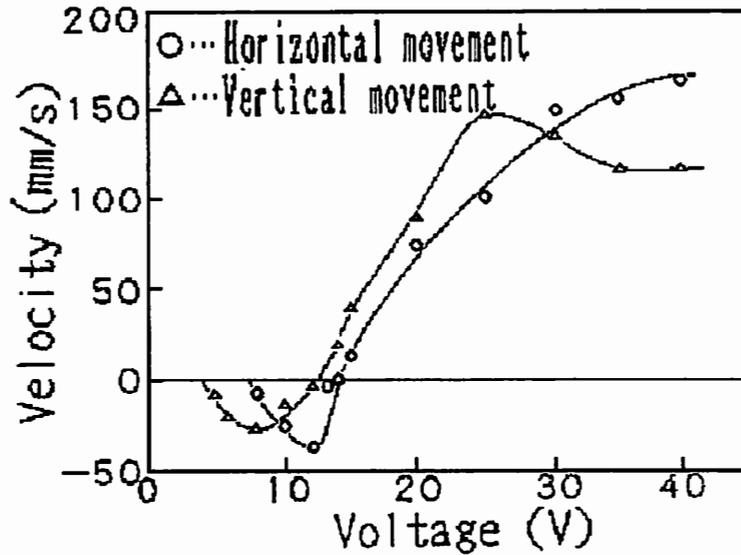
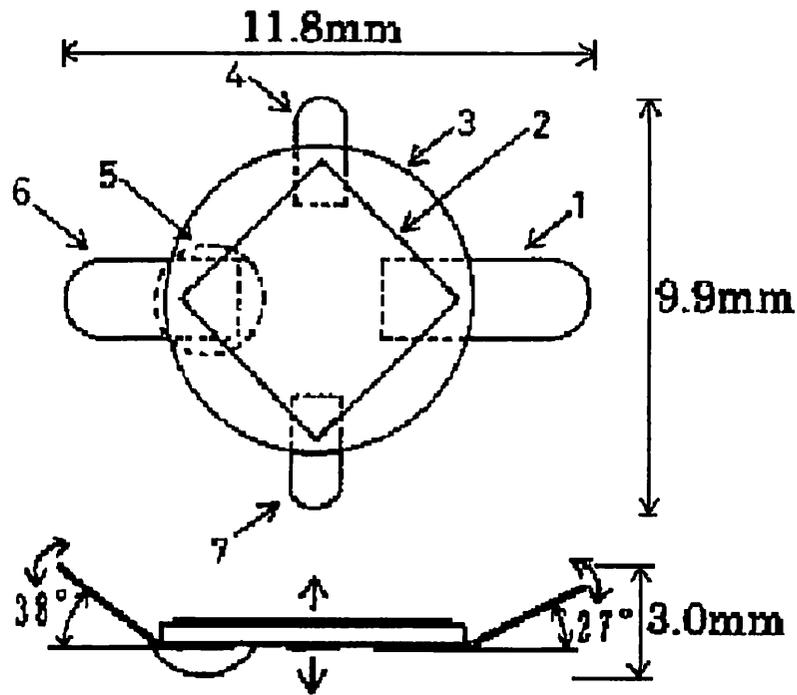


図 3.27: 印加電圧と水平および上下移動

で変化させて、上下の移動実験を行い、その移動速度を求めた。その結果を図 3.39 に示す。図 3.39 は、縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加周波数 (kHz) を表す。図 3.39 から、上昇は■印で、最大速度は 19kHz で 1.3mm/s となり、降下は◆印で、最大速度は 17kHz で 19.4mm/s となった。この結果では、降下の最大速度が上昇速度よりも約 15 倍の差となった。これは移動体が上昇するときはエナメル線を引き上げながら上昇し、降下するときには、エナメル線が降下する重力により、降下速度が大きくなったと思われる。

3.4.7 ビニールチューブ内の移動について

内径 4mm の透明ビニールチューブ内での前後進の移動実験を行った。ビニールチューブを水平に置き、印加電圧を $40V_{p-p}$ にして、印加周波数を変化させた。その結果、移動体は 17kHz で 9.6mm/s の前進速度となった。しかし、後進はいくら印加周波数を変化させても移動せず、停止したままだった [51]。



- 1・6 : Phosphor bronze sheets
- 2 : Piezoelectric element
- 3 : Metal disk
- 4・7 : Phosphor bronze sheets (auxiliary sheet)
- 5 : Weight

図 3.28: 改良型 2 方向移動体の構造

3.4.8 考察

圧電アクチュエータを使用した細管内移動体について考察すると、圧電アクチュエータは 10 数 kHz 以上と応答速度が早く、変位精度も高いので細かい位置決め精度などが可能であり、印加電圧の大きさだけで振動変位の大きさが変えられ、印加電流の値はそう大きくないといえる。しかし、圧電アクチュエータは振幅変位が大きく取れず、力の発生力も小さいという欠点もある。そのため振動変位を大きく取るためには、機構的な補完が必要となる。移動体の構造を検討するためには、如何に振動変位を大きく取れるかが問題になると思われる。

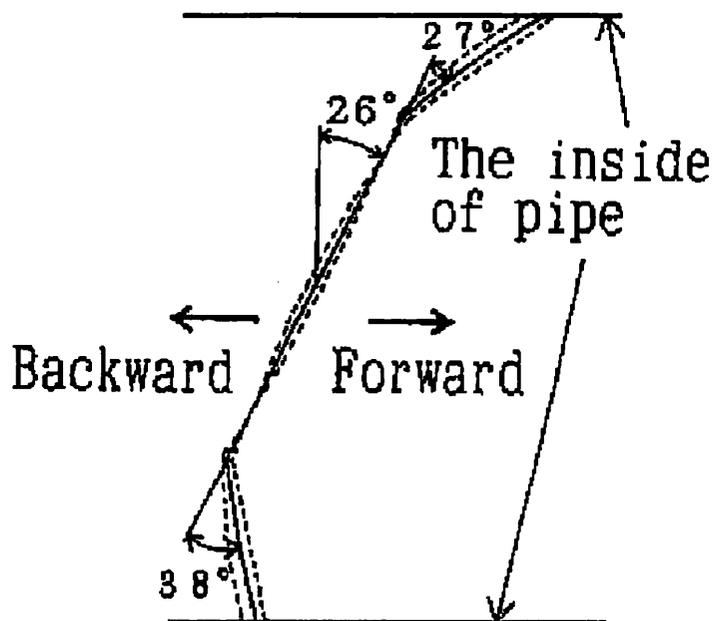


図 3.29: 移動体の移動方法

最後に、形状記憶合金、電磁力、圧電の三つのアクチュエータを使用し、細管内移動体を試作して種々の移動実験を行って、その実験結果を示したが、三つのアクチュエータを使った移動体の簡単な比較をすると、それぞれのアクチュエータに一長一短があり、移動目的によってアクチュエータを選択する必要があると考えられる。

表 3.1: 各アクチュエータの比較

アクチュエータ	動作周波数	動作速度	動作変位	移動速度
形状記憶合金アクチュエータ	0.1Hz 程度	遅い	大きい	数 s 程度
電磁力アクチュエータ	1kHz 以下	中位	大きい	数 10 mm/s 程度
圧電アクチュエータ	数 10kHz 程度	早い	小さい	速い

しかしながら細管内移動体として、三つのアクチュエータの中で圧電アクチュエータを使用した細管内移動体が最適ではないかと考えられる。その理由として、圧電アクチュエータは形状記憶合金や電磁力アクチュエータに対して応答速度が早く、変位精度が高いので細かい位置決め精度が可能である。また、電磁力アクチュエータのように、印加電力が必要されるのではなく、印加電圧だけで変位の大き



図 3.30: 移動体の屈曲振動

さを変えられるので、消費電力は小さいといえる。そのため、電磁力アクチュエータは振動中手が触れない位に熱が発生するが、圧電アクチュエータは触っても熱くなく使用電流が少ないと考えられる。

しかし、圧電アクチュエータは振幅変位を大きく取れず、発生力も小さいという欠点があり、そのため振幅変位を大きく取るためには、機構的な補強が必要であり、細管内を移動させるための移動体の構造も、この点の対策が必要であると思われる。

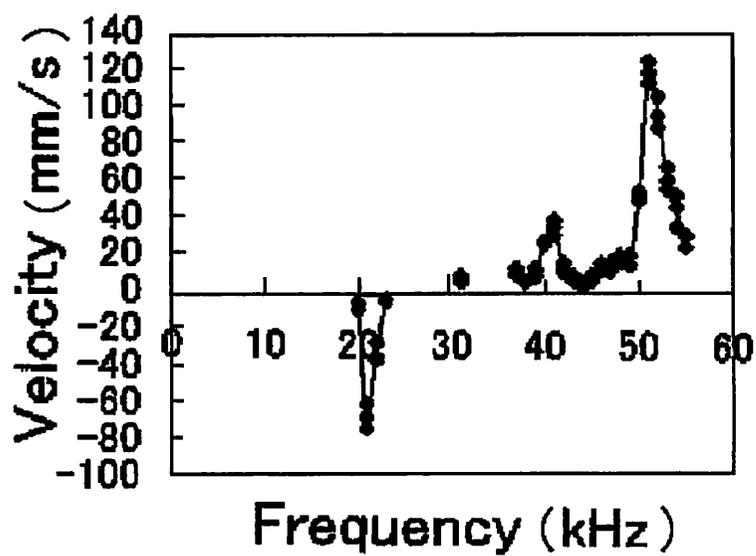


図 3.31: 印加周波数と水平移動速度の関係

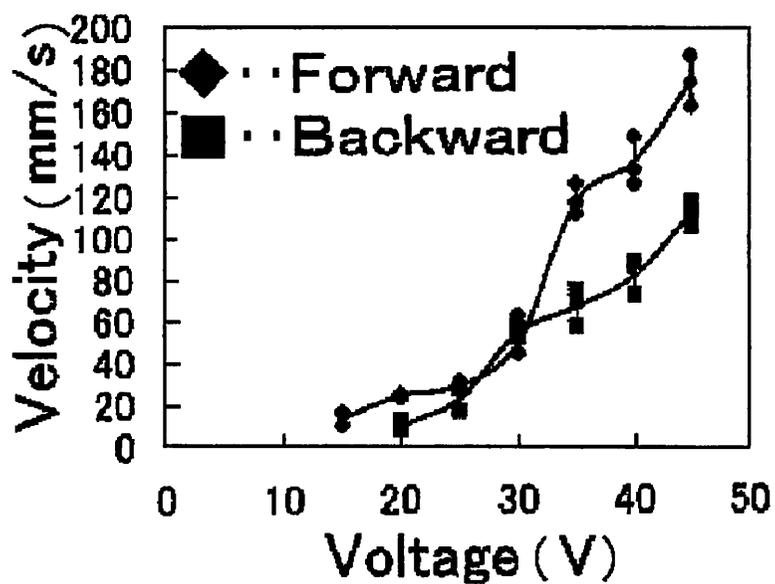
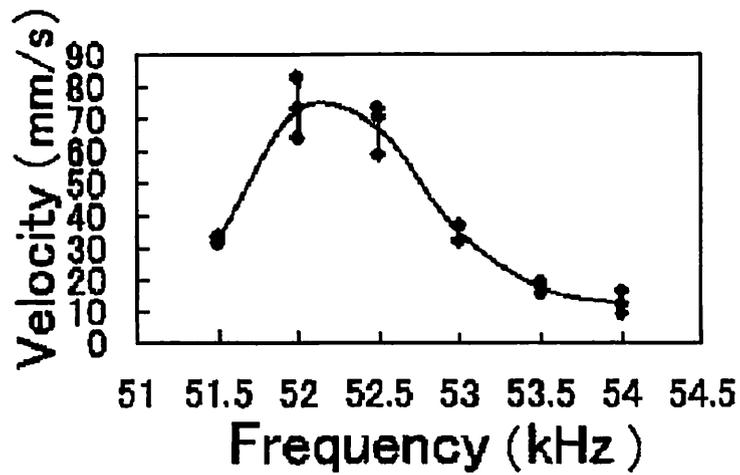
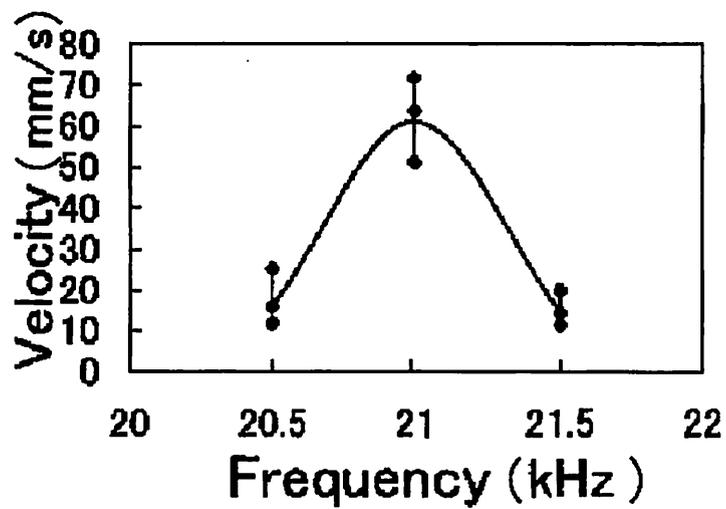


図 3.32: 印加電圧と水平移動速度の関係



(a) Forward movement's velocity



(b) Backward movement's velocity

図 3.33: 印加周波数と移動速度の関係

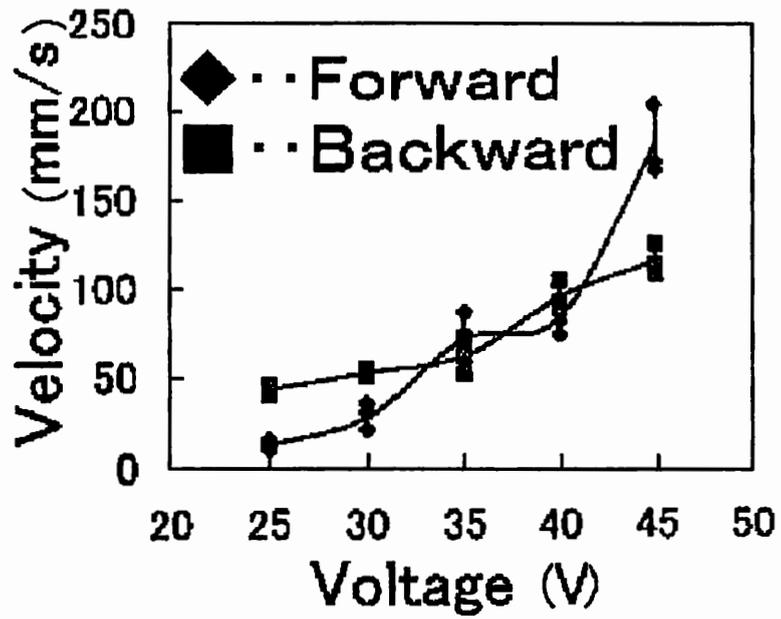
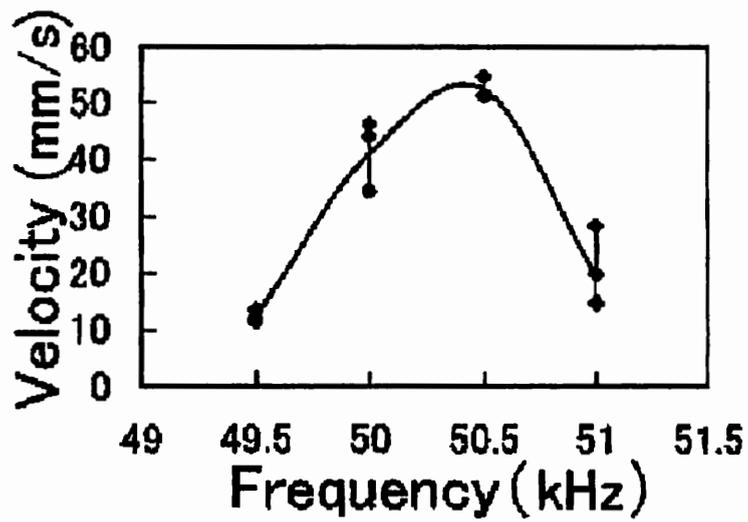


図 3.34: 印加電圧と水平移動速度の関係



(a) Up velocity

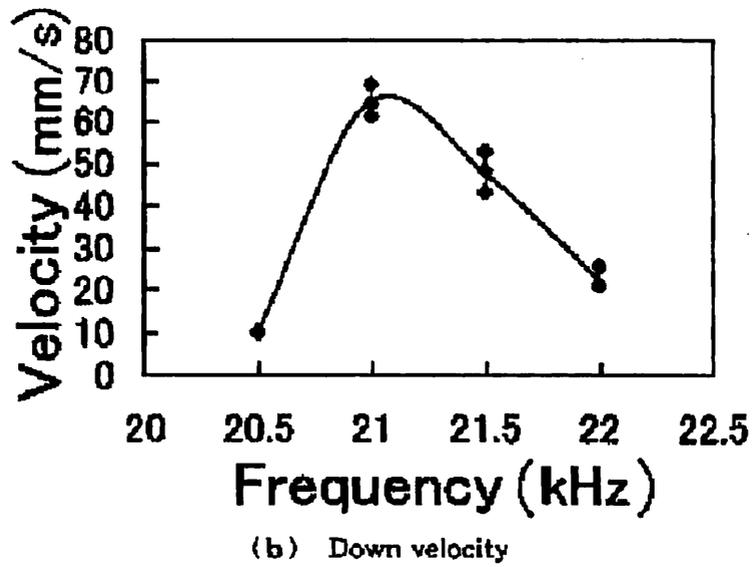


図 3.35: 印加周波数と上下移動速度の関係

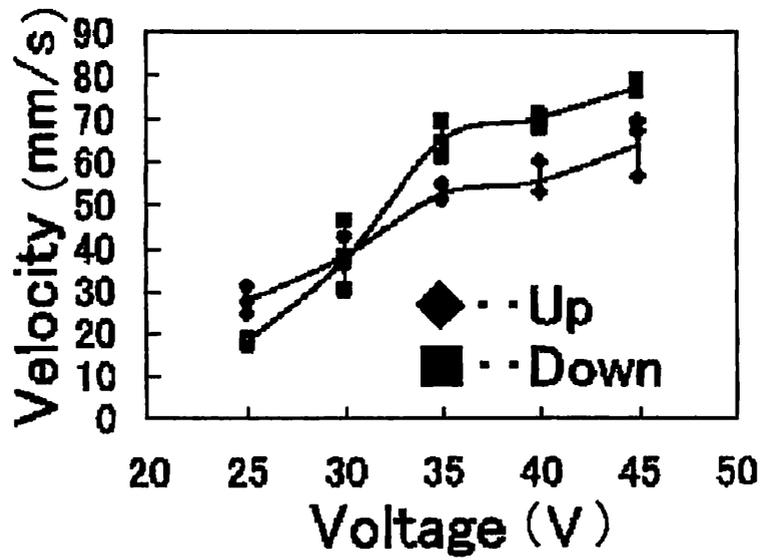
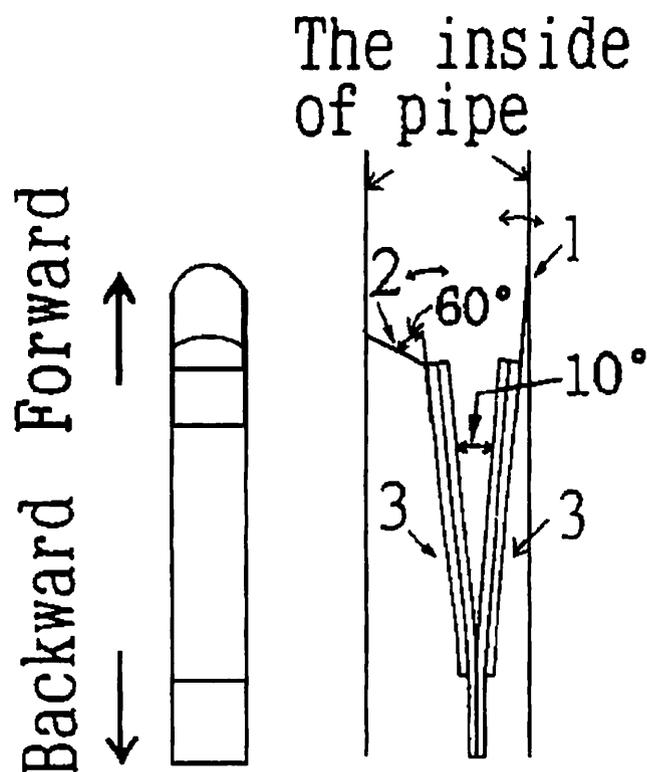


図 3.36: 印加電圧と移動速度の関係



- 1 : Phosphor bronze sheets A
- 2 : Phosphor bronze sheets B
- 3 : Piezoelectric element

図 3.37: 内径 4mm 細管内移動体の構造

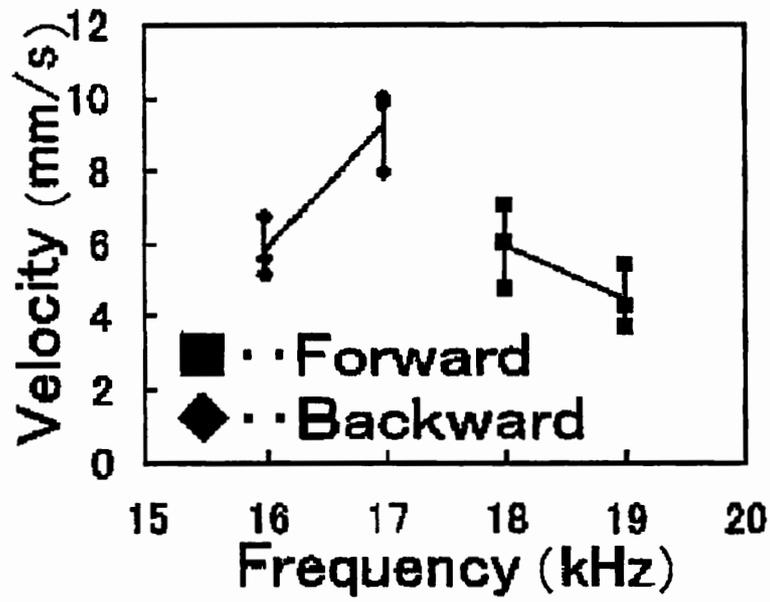


図 3.38: 印加周波数と水平移動速度の関係 (内径 4mm)

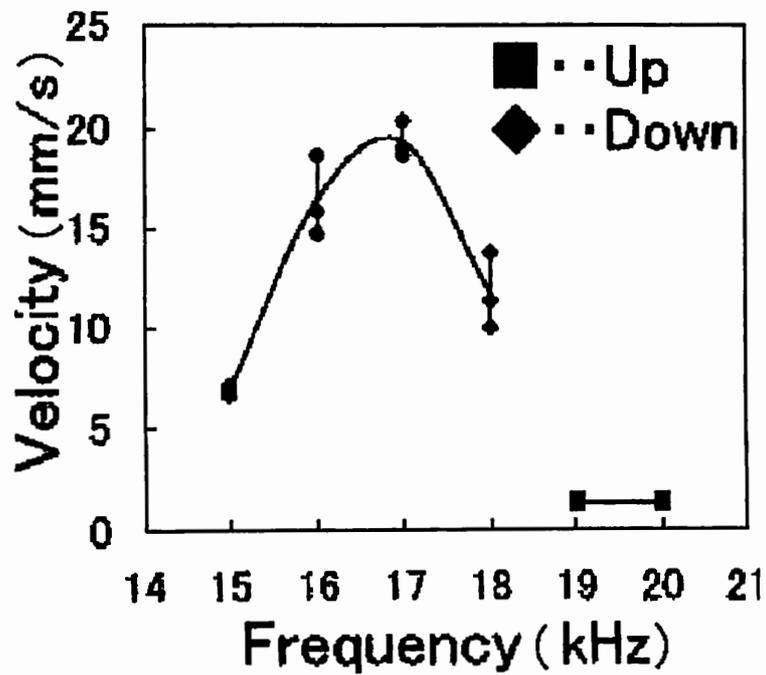


図 3.39: 印加周波数と上下速度の関係 (内径 4mm)

第4章 ワイヤレス細管内移動体

4.1 はじめに

現在、管内の物資輸送や搬送は、ほとんどが長距離の大量輸送として実用化されている。しかし、輸送したい物資によっては、少量輸送や多種類の一括輸送、または建物内を搬送する短距離輸送がある。例えば、薬や種々の検査資料または宝石などの貴金属の輸送などは、壁の中をカプセル輸送することにより、人の目に触れられず、防犯上の安全輸送を行うことができる。その際管内の輸送用に使用されている水や空気などの作動流体では、防音対策や水密性の管理などが必要となり、大きな設備が必要となる。また、空気による物資輸送は傾斜角度が数度程度で物資を上昇させる推力が得られず、垂直方向の上昇輸送は水の力を借りている。しかし、実際に水による管内輸送はほとんどが濡れても良いものを輸送している。

ここで問題になるのは、エネルギーの自給性ということである。筋肉を考えてみればよくわかる。生体の筋肉は、何億個というサルコメアを集積したものである。これを模倣してできた素子をアクチュエートするのに、工学的に考えて従来のな方法で、電線やそのほかのシステムを使ってアクチュエータを動かすという発想では、集積化した素子を動かすことはできないという。エネルギーを自給し、あるいはエネルギーを与えると、自分で取り込み、動くようなシステムが必要となる。この意味では、場のエネルギーを使うことは非常に有望である。熱エネルギーは、熱力学の法則に反して等温の場からは取り出して使用することはできない。したがって、ブラウン運動のような等温の条件下で発生した振動を取り出すには、何らかの形で、温度差や、外からの振動を励起するようなエネルギーを与えなければ利用できない。このような目でみると、対外からの場のエネルギーとして与えられる超音波や、光、電磁場というようなエネルギーを利用する移動する移動体を作ることが必須の条件になる [52]。

ワイヤレスエネルギー供給方法には、内部供給タイプと外部供給タ

イブに分けられる。内部供給するエネルギーは電気エネルギーが大半である。電気エネルギー供給方式としてはバッテリーを利用するものと、コンデンサを利用するものと考えられる。

しかし、バッテリー形式は出力と持続力に優れているが、小型化に難点があり、コンデンサ形式では、いかに小型で高容量のコンデンサを製作するかが問題となる。

外部供給タイプとしては、(1) 光供給形、(2) 電磁供給形、(3) 超音波供給形、(4) その他としてマイクロ波などを利用したワイヤレスエネルギー供給方法があり [40]、光エネルギー供給には PLZT セラミックスを利用した光アクチュエータのように、光を照射することにより、光ひずみ変位を利用する方法 [41] や、電磁エネルギー供給では超磁歪素子を利用する方法があり、これは配管の外側から交流磁界を変化させる磁気回路により、ワイヤレスで移動体を管内走行することができる [42]。また、超音波エネルギー供給は、波動エネルギーを推力として細管内を移動する方法が考えられる [43]。さらに、マイクロ波によるエネルギー供給は、金属細管をマイクロ波の導波管として使用し、マイクロ波の波長を配管内径に合わせて適切に選択して、マイクロ波を細管内に伝搬させて、管内移動体にエネルギーを供給するもので、移動が確認されている [44]。しかし、これらのワイヤレスエネルギー供給方法を使って、実際に実用化されている例は見当たらない。

4.2 超音波放射力を用いた細管内移動体

4.2.1 超音波放射圧について

音波の伝搬は、波動エネルギーの流れであり、これを物体でさえぎると、その物体を音波の伝搬方向に押す力が生じる。音波としての流体の微小要素の振動的な運動とは異なり、時間平均値が0でない有意な作用として生じる。この力は音響放射圧による力で、2次の微小量として現れてくる非線形現象であるため、通常の実験条件では微弱である。例えば、水中に置かれた完全吸音体または球に作用する力は、音の強さが $1\text{W}/\text{cm}^2$ のとき、わずかに $66.7 \times 10^{-5}\text{N}/\text{m}^2$ にすぎない。しかし、この力は物体のみならず音波の伝搬媒質にも作用し、アコースティック・ストリーミングと呼ばれる流体運動を引き起こす。

音響放射圧の理論的研究は古く、1902年の Lord Rayleigh の論文までさかのぼる。この現象の理論的な取り扱い方として、断熱不変の定理を使う方法と流体力学的な方法の2種類がある。ここでは、断熱不変の定理を使って、放射圧の理論的な説明をする [27]。

図 4.1 に示すように、円環に弦を通して張力 G を加える。この円環を支点にして弦を振動させると、弦の変位角 θ にしたがって円環には G' の力が働き、弦の振動部の長さ l が長くなろうとする。この力 G' の時間平均が放射圧になる。音波の振動の場合も同様の考え方をすることができる。この場合には音響管を伝搬する1次元の振動を考え、円環の代わりにピストンを置けばよい。この放射圧は、

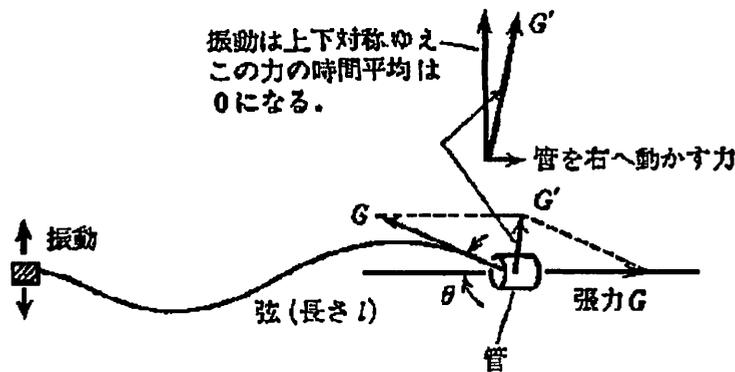


図 4.1: 円環に働く G' の力

[振動のエネルギー ε と振動周期 T の積は一定] という断熱不変の定理を用いて求めることができる。これを微分形で表すと、

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{dT}{T} = 0 \quad (4.1)$$

が得られる。また音響管の長さ(弦の長さ)を l 、波の速度を c 、定在波の腹の数を n とすれば $\frac{1}{2}ncT = l$ の関係があるので、これを全微分して次の式が得られる。

$$\frac{dc}{c} + \frac{dT}{T} = \frac{dl}{l} \quad (4.2)$$

さて、放射圧 P によって断面積 S のピストンが dl 動けば、それによって振動エネルギーが $d\varepsilon$ 減少するはずだから [仕事=力×距離] の関係から

$$d\varepsilon = -PSdl \quad (4.3)$$

が得られる。ここで流体では密度 ρ と円筒の長さ l の積は一定であり、したがって $\frac{dl}{l} = -\frac{d\rho}{\rho}$ であることに注意して、放射圧 P を求めて、エネルギー密度 $E = \frac{\varepsilon}{Sl}$ を用いて表すと次のようになる。

$$P = E\left(1 + \frac{\rho}{c} \frac{dc}{d\rho}\right) \quad (4.4)$$

これまでの説明は定在波について行ったが、進行波でも同じことであり、むしろ定在波は進行波と反射波が重なった2倍のエネルギー密度の音波と考えると理解しやすい。

エネルギー密度 E と音の強さ I とは $E = \frac{I}{c}$ の関係を持っている。したがって、放射圧は媒質中の音速 c と反比例の関係になり、音の強さが同じでも音速が小さい媒質のほうが放射圧は大きくなる。

放射圧の式(4.4)の右辺第1項 $P_1 = E$ が弦の振動を利用して説明を加えた振動エネルギー流による放射圧で、力の方向は波の進行方向、すなわちピストンに垂直である。よって方向性をもち、放射応力と呼ぶべき力である。

式(4.4)の第2項の

$$P_2 = E \frac{\rho}{c} \frac{dc}{d\rho} \quad (4.5)$$

は流体の密度が変動するために生じる圧力で、力の方向性はない。管内を伝わる音波のように、媒質中を一方向にのみ進行する波を平面波という。平面波において、単位面積に加わる放射圧 P には、

$$P = E \quad (4.6)$$

の関係がある [46].

4.2.2 超音波放射力による細管内移動

移動体が前進移動するのは、超音波の放射圧が関係しているのではないかと考えられる。図4.2に移動体が細管内を移動するときの概略図を表す。細管内の超音波は、図4.2の x 方向のみに音波が伝わる平面波(一次元の音波)になる。

ここで、細管内径 11mm に対して、移動体の振動板直径が 9mm なので、簡単化するために、移動体の振動板を閉管端と考える。閉管端において媒質の粒子速度は0になり、常に音圧変動が最大とな

る(定常波の腹となる)。すなわち、移動体の振動板では、超音波のエネルギー密度 E [62] は、

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} \quad (4.7)$$

となる。ここで、 P は音圧の振幅、式(4.6)と式(4.7)から、移動体に加わる圧力は次式で示される。

$$P_r = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} \quad (4.8)$$

単純に放射圧のみで移動体を押ししているとすれば、移動体の脚先端と接触している管内壁面との静摩擦係数を μ 、移動体本体の面積を S 、移動体の質量を m として、

$$\mu mg < P_r S = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} S \quad (4.9)$$

式(4.9)のとき、移動体が前進移動すると考えられる。

そこで、式(4.9)の有効性を検証するために、実際に数値を代入して移動に必要な音圧 P を概算として計算した。式(4.9)に代入した数値を以下に示す。静摩擦係数 μ の値は、簡単に細管を傾斜させて移動体が滑り始めた、その傾斜角度を測定して求める傾斜法で求めた値である。

$$m = 0.26 \times 10^{-3} \text{kg}$$

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

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

$$c = 346.38 \text{m/s}$$

$$S = 63.62 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$\mu = 0.4$$

以上の数値を代入して計算を行ったところ、移動に必要な音圧 P は、

$$|P| > 369.92 \text{ Pa} \quad (4.10)$$

となった。式(4.10)の値は約 370Pa なので、最低で 269Pa の力で移動体が移動し始めている結果が出ていることから、370Pa と 269Pa の差分が、摩擦力の減少分ではないかと推測される。また、移動体

が前進移動するのは、放射圧による力が影響していると思われる [48].

以上から考察結果をまとめると、超音波が細管内に送波されると、図 4.2 のように、移動体本体が超音波を受波して共振振動し、移動体には周期的な力が加えられ、周期的な力を受けた移動体は、脚と細管内壁との接触点において微小な振動が発生し、その振動により摩擦面相互間には、摩擦方向の変化による摩擦力の相殺、あるいは平均化により摩擦力が減少する [49] とと思われる。さらに、超音波の放射圧による力によって移動体が前進移動すると思われる。

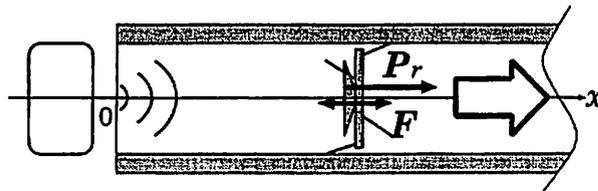


図 4.2: 超音波放射力による移動体の移動

4.2.3 考察

以上の研究結果から考察を述べると、超音波を使ったエネルギー供給により、ワイヤレスで細管内を移動体が移動できることが可能となった。その際、出力音圧と最大移動距離の関係、および出力音圧と移動速度の関係はともに出力音圧を大きくしていくと、最大距離や移動速度が二次曲線的に大きくなることがわかった。また、細管内に超音波を送波することにより、移動体自体の振動による摩擦力の減少と放射圧の力による移動の推力を受けて、移動体が前進移動するものと考えられる考察結果を得た。

4.3 圧電型加振機を使用した加振式細管内移動体

そこで本研究は、少量輸送タイプの細管内カプセル輸送の開発を目指し、作動媒体として、超音波振動を使った新しいカプセル輸送技術の開発を行っている。その研究過程において、垂直細管に直接超音波振動を与えて細管を振動させ、その振動でカプセルを上下移

動する研究を行った。

本研究において、実際に垂直細管内を上下移動する移動体を製作して、その構造を示し、また移動実験を行ったので、その実験結果を示す。本移動方法の特徴は、上下移動とも細管の加振装置は全く同じものを使用し、移動体の上下移動方向を切り換える切替装置は必要なしで切り替わる。その移動方法を説明するために、上下移動時の細管の振動波形を計測し、移動体の上昇時と降下時の細管の振動の違いを比較しながら、上下移動の原理の考察を行ったので、その結果を報告する。

4.3.1 移動体の構造

本研究で考案し、製作した移動体の構造を図 4.3 に示す。図 4.3 は、外径 3.5mm、長さ 5.0mm のポリプロピレン製の円筒軸の片端に、移動体と管軸方向との平行性を保つために、厚さ 25 μ m、直径 6.0mm のアルミニウム円板を接着剤で接着した。反対側の片端には、上下移動に必要な推力を得るための、厚さ 30 μ m、長さ 6.9mm、幅 3mm の大きさのりん青銅板を接着した。そして、図 4.1 のように、りん青銅板の上側には、円筒軸の垂直方向から 10° の角度で長さ 2mm のりん青銅板を曲げ、下側には、りん青銅板を円筒軸の垂直方向から 48° の角度で長さ 3mm にして曲げた。また、移動体の自重は、0.21mN である。

なお、移動体の移動方向は、図 4.1 に示すように、アルミニウム円板側方向を上昇とし、その反対のりん青銅板側に移動する方向を降下とする。

4.3.2 実験装置

上下移動の実験システムの概略を図 4.4 に示す。実験に使用した細管は、内径 7mm の透明ガラス直管の細管で、図 4.4 のように、ガラス製細管（以後は細管と呼ぶ）を垂直方向に立てて、120mm の間隔にして固定治具で固定する。そして、細管に超音波加振機（以後は加振機と呼ぶ）の先端を上下とも 60mm の距離にして、その中心を接触角度 θ で接触させる。細管を加振する加振機は、共振周波数が 40kHz のボルト締めランジュバン型超音波振動子（コウワ技研製

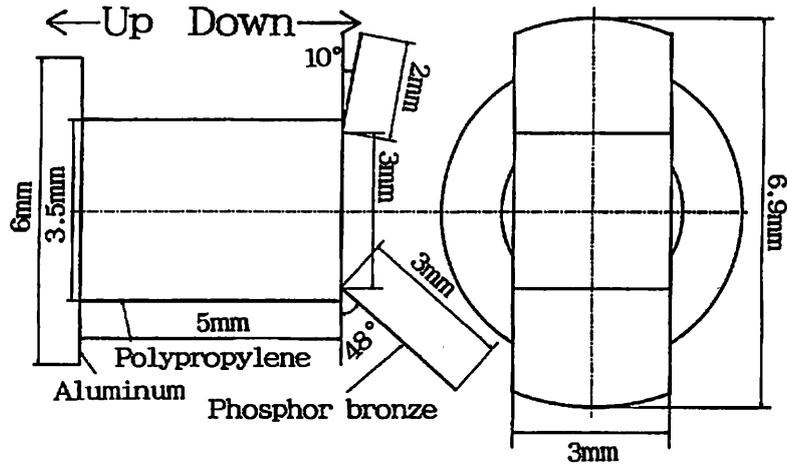


図 4.3: 移動体の構造

DA21540F) であり，加振機に印加する電圧は，発振器から 40kHz の矩形波パルスを出力し，その出力をバースト信号にするために，別の発振器から間欠パルスを出力し，その間欠パルスによってバーストパルスに変換して出力する．バースト出力された信号はアンプによって 10 倍に電圧増幅され，加振機に入力して細管に接触させて超音波加振する．

4.3.3 上下移動実験

間欠周波数と上下速度

始めに，加振機を振動させるための，バースト信号を変化させる間欠周波数と上下移動速度との関係，およびバースト信号ではなく，40kHz の周波数での連続加振と上下移動速度との関係を調べた．

実験方法は，加振機の先端と細管との接触角度 θ を 90° に固定して接触させ，加振機の印加電圧を 80V_{p-p} にして，40kHz の連続パルスと，間欠周波数を 2.5kHz から 40kHz まで 2.5kHz 刻みで変化させ，移動体の上下移動速度を測定した．上昇は，細管内の移動体が加振機の加振点の下方 10mm の位置から 20mm 上昇したときの時間を測定した．降下は，移動体が加振点の上方 10mm の位置から 20mm 降下したときの時間を測定した．そして，それぞれ上下移動

距離と測定時間から、上下移動速度を計算した。これを5回繰り返して、その平均値を求めた。求めた結果を図4.5に示す。

図4.5は、縦軸は上下移動速度 (mm/s)、横軸は間欠周波数 (kHz) を示す。また、縦軸のマイナス側は降下の速度を示し、プラス側は上昇の速度を示す。ここで、図4.5のグラフ内の各測定点での実線の縦幅は、測定点での測定値のばらつきの程度の範囲を示す。そして、図4.5以降の測定結果の図において、全てグラフ内での実線の縦幅は、測定値のばらつきの程度を示す。

図4.5から、間欠周波数を変化させると移動体が上下移動していることや、それぞれその移動速度が変化しているのがわかる。そして、間欠周波数を変化させると、そのほとんどが上昇しているが、間欠周波数が7.5kHz,15.0kHz,32.5kHzの値では、移動体は降下した。その中でも7.5kHzは、特に降下速度が大きかった。また、間欠周波数が0kHzのとき、つまりバースト加振ではなく、40kHzの連続加振にしたとき、移動体は上昇し速度も大きい値を示した。しかも、速度にばらつきが少なく安定した上昇を示している。

上昇移動

移動体の上昇移動について、実験を行ったので、以下に、その実験方法と結果を示す。

a. 接触角度と上昇速度

加振機の印加電圧を80V_{p-p}にして、加振周波数を40kHzの連続発振とし、加振機と細管の接触角度 θ を60°から120°まで10°刻みで角度を変化させて、移動体の上昇速度の測定実験を行った。

測定方法は、細管内の移動体を加振機の加振点から下方10mmの位置に停止させ、細管を加振して、移動体が20mm上昇するのにかった時間を測定する。そして、上昇距離を測定時間で割って上昇速度を計算する。それを5回行って上昇速度の平均値を求める。その求めた結果を図4.6に示す。図4.6は、縦軸は上昇速度 (mm/s)、横軸は接触角度 (°) を示す。

図4.6から、接触角度 θ が90°のときが平均すると上昇速度が大きい値を示した。また、測定結果は90°から離れていくごとに、速度のばらつきが多い結果となった。これは、移動体が細管内を滑ら

かに上昇しているのではなく、不安定な挙動で上昇しているのではないかと思われる。

b. 印加電圧と上昇速度

加振機と細管の接触角度 θ を 90° にし、加振機の出力を 40kHz の連続加振とし、印加電圧を $10\text{V}_{\text{p-p}}$ から $80\text{V}_{\text{p-p}}$ まで $10\text{V}_{\text{p-p}}$ 刻みで電圧を変化させ、移動体の上昇速度を求めた。

測定方法は、細管内の移動体を加振機の加振点から下方 10mm の位置に停止させ、細管を加振して、移動体が 20mm 上昇するのにかかった時間を測定する。そして、上昇距離を測定時間で割って上昇速度を計算し、それを5回繰り返してその平均値を求めた。その結果を図4.7に示す。図4.7は、縦軸は上昇速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 ($\text{V}_{\text{p-p}}$) を示す。

図4.7の結果から、印加電圧が $20\text{V}_{\text{p-p}}$ を境にして、それ以下では、移動体は細管内に止まったままで上昇せず、 $20\text{V}_{\text{p-p}}$ 以上に印加電圧を大きくしていくと、移動体は上昇した。印加電圧をさらに大きくしていくと、上昇速度は大きくなる傾向を示した。また、上昇速度のばらつきの程度は小さく、移動体が細管内で安定したスムーズな上昇を示していると思われる。

降下移動

移動体の降下移動について、実験を行ったので、以下に、その実験方法と結果を示す。

a. 接触角度と降下速度

加振機の印加電圧を $80\text{V}_{\text{p-p}}$ にし、間欠周波数を 7.5kHz にして、加振機と細管の接触角度 θ を 60° から 120° まで 10° 刻みで角度を変化させて、移動体の降下速度の測定実験を行った。

測定方法は、細管内の移動体を加振機の加振点から上方 10mm の位置に停止させ、細管を加振して、移動体が 20mm 降下するのにかかった時間を測定する。そして、降下距離を測定時間で割って降下速度を計算する。それを5回行って降下速度の平均値を求める。その求めた結果を図4.8に示す。図4.8は、縦軸は降下速度 (mm/s)、横軸は接触角度 ($^\circ$) を示す。

図4.8からわかるように、移動体は加振機とガラス管の接触角度

θ が 90° のときだけ降下し、それ以外の角度では停止したままだった。これは、接触角度が 90° から少しでも変わると、加振力が細管の表面を伝わるが多くなって、細管の垂直方向の力が減少し、移動体のりん青銅板の先端が、管内壁面に引っ掛かって移動体が止まってしまうためではないかと考えられる。

b. 印加電圧と降下速度

加振機と細管の接触角度 θ を 90° にし、間欠周波数を 7.5kHz にして、印加電圧を 10Vp-p から 80Vp-p まで 10Vp-p 刻みで電圧を変化させ、移動体の降下速度を求めた。

測定方法は、細管内の移動体を加振機の加振点から上方 10mm の位置に停止させ、細管を加振して、移動体が 20mm 降下するのにかかった時間を測定する。そして、降下距離を測定時間で割って降下速度を計算する。それを5回繰り返してその平均値を求める。その結果を図4.9に示す。図4.9は、縦軸は降下速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (Vp-p) を示す。

図4.9の結果から、印加電圧が 30Vp-p を境にして、それ以下では、加振力が小さく移動体を降下させる力がないことを示す。また、それ以上に大きくすると、移動体が降下し始め、降下速度が大きくなっていく傾向を示した。しかし図4.9を見ると、各測定点での測定値のばらつきの範囲が大きく、不安定な滑らかではない降下挙動を示していると思われる。

4.3.4 考察

(1) 移動体の上下移動について考察すると、これは移動体の構造に特徴があり、移動体には傾斜角度を持たせたりん青銅板が接着されているため、細管壁面に対して、りん青銅板の先端が斜めに接触することで、上下移動方向時に対する摩擦係数に違いが表れ、図4.3の構造を見ると、りん青銅板と壁面との接触角度は、上昇方向側のほうが角度が小さく降下方向側は角度が大きい。このことは、上昇移動のほうが降下移動よりも摩擦係数は小さく [73]、そのため、移動体は上昇しやすく降下しづらい構造を示していると思われる。

(2) 図4.5の実験結果において、加振機と細管の接触角度が 90° あたりで移動体の上昇速度が大きいのは、細管に直角に接触することが、加振機の振動が減衰なくそのまま細管に伝わるため、振動の振

幅が大きく得られ、速度が大きくなったのではないかと思われる。加振機の接触角度を変えることによって、先端が管壁に斜めに当たることによって、加振力の一部が細管の管軸方向に伝搬してしまつて、管軸の垂直方向の加振力が減衰し、振動の振幅が小さくなって、上昇速度は小さくなってしまったのではないかと考えられる。

(3) また、図 4.6 の実験結果において、加振機と細管の接触角度が 90° のときだけ移動体が降下したのは、加振機の角度が 90° 以外では、考察 (2) と同様で、加振力の一部が、細管の表面上を伝わって流れてしまい、壁面に垂直の加振力が減衰し、加振機の加振振幅が小さくなったと思われる。そのため、細管内壁にりん青銅板の先端が引っ掛かって止まっている移動体を、加振降下させる力が小さく、先端が壁面に保持されたままになって、停止して降下しなかったのではないかと思われる。

以上の結論として、移動体の上下移動には、加振機と細管の接触角度 θ は 90° が、最適であることがわかった。

(4) 実験において、細管にガラス管を使用したのが、他の材質の細管、例えば、同じ内径 7mm の透明アクリル細管を使ってガラス管と同様な実験を行ってみたが、管内壁面とりん青銅板の先端との摩擦が大きく、移動体はわずかな速度での上昇傾向を示したが、ほとんどは停止したままの状態であった。

このことから、りん青銅板の先端と細管内の接触壁面との摩擦の問題は、移動体の上下移動に大変重要な要素であると思われる。今後は、種々の材質の細管での移動実験を行って、接触点の摩擦について、考察する必要があると思われる。

(5) 本研究は、外部から直接垂直細管に超音波加振を行うことで、細管内を移動体が上下移動することが可能となった。そして、移動体の上昇および降下時の細管の振動波形を観測すると、二つの波形に違いが見られ、この振動形態の違いが、上下移動に関係していると思われる。

本移動方法は、垂直細管だけでなく、水平管の途中で細管を加振して、管内を移動体が移動する水平細管内移動も可能であり、また、長距離の移動も加振機を細管にある一定の間隔毎に接触させて、加振機を順々に連続的に加振することにより、移動体を長距離移動させることが可能と考えられる。

4.4 動電型加振機を使用した加振式細管内移動体

4.4.1 移動体の構造

動電型加振機を使用した加振式細管内移動体の構造を図4.10に示す。図4.10は、厚さ0.05mm、幅3mmの2枚の黄銅板からなり、これらの黄銅板は、黄銅板Aの上端から3mmのところ、約 50° の角度で黄銅板Bを半田付けで接着してある。ここで、2枚の黄銅板が接着してあるほうを上端とし、開いているほうを下端として、本項以後は説明する。黄銅板Aは、長さ21mmで、下端から約8mmのところ、約 20° の角度にして曲げた。黄銅板Bは、長さ25mmで、下端に約120mgの半田の塊を付けた。この塊は、移動体が細管内で安定した移動を行うために付けた。黄銅板A、Bとも、管内壁面と接触する部分は先端を丸く削った。なお、移動体の移動方向は、図4.10の半田の塊がある方向を前進とし、その反対方向を後進とした。また、移動体の自重は220mgである。

4.4.2 移動実験と結果

水平細管内前後移動実験

a. 実験方法

図4.11に、実験方法の概略を説明する。細管の加振は、発振器から正弦波パルス信号を出力して電力増幅器(国際機械振動研究所, VA-ST-03)に入力する。電力が増幅されたパルス信号は、加振機(国際機械振動研究所, VEH-10)に入力する。加振機は動電型で最大加振力は98.067N、最大変位は 5mm_{p-p} である。実験に使用した細管の大きさは長さ530mm、内径15mmのアルミニウム材質の直管である。実験方法は、細管を水平にして向かって右側の管端から75mmのところをクランクで掴み、その部分に加振力を与え、内部を移動する移動体の前後進速度を測定した。

移動体の前進は、図4.11の移動体の前進方向の向きを先に、向かって右側の管端から入れ、後進の場合は、移動体を左右逆向きに入れる。そして、右側の管端の入口に移動体を停止させて、細管を加振させて移動させる。反対側の管端から出てくるまでの時間を計測して、移動距離を計測時間で割って速度を測定した。このとき加振周波数は、前進は80Hz、後進は215Hzを与えた。加振機に与え

た印加電圧は、実効値で3から6Vの範囲で与えた。

b. 実験結果

実験結果を図4.12(a), (b)に示す。ここで、前進を80Hz、後進を215Hzを与えたのは、その値の周波数を与えたときに移動速度が最大のときの周波数である。この周波数の値がどうして、移動速度が最大となったのかについて、説明する必要があるが、この問題については、理論的な解析が必要となり、今後検討すべき問題と考えられる。また、前進と後進の周波数が異なるのは、移動体の向きを変えて移動させたことによると考えられる。実験結果から、前進及び後進とも印加電圧を大きくすると、移動速度も大きくなる傾向となった。

垂直細管内上下移動実験

a. 実験方法

図4.13に細管の垂直上下移動実験の概略を示す。上下移動実験は、加振機を横に倒して、前項と同じ直管を使用して、細管を垂直方向に立てて、下端の管端から75mmのところをクランクで掴み、細管に対して垂直方向の左右に加振を与えて、移動体の上昇及び降下の速度を測定した。ここで、移動体の上昇は、図4.13の前進方向と同じ向きに上昇移動することとし、降下は、図4.13の後進と同じ向きに降下移動することとする。加振機の印加電圧は、実効値で3から6Vの範囲で与え、そのときの移動体の移動速度を測定した。

b. 実験結果

実験結果を図4.14(a), (b)に示す。ここで、前進を75Hz、後進を215Hzを与えた。この加振周波数は、移動速度が最大のときの周波数である。図4.14(a), (b)から、細管を加振することにより、移動体が上下移動することが確認できた。ここで、上昇の最大速度は、6Vのとき、約107mm/sとなった。また、降下の最大速度は同じく6Vのとき、約50mm/sとなった。また、上昇、降下速度とも、印加電圧を大きくしていくと、ほぼ比例して移動速度は大きくなった。

曲管内水平移動実験

a. 実験方法

図4.15に曲管内水平移動の実験方法の概略を示す。内径15mmの

アルミニウム材質の曲管を加振機を加振面と平行にして、片方の管端から 65mm のところを掴み、曲管を垂直方向に上下に加振する。実験は、クランプで掴んだ側の管端の入口に移動体を前進及び後進向きにして停止させ、曲管を加振して、反対側の管端から出てくるまでの時間を測定して、曲管に移動距離を測定時間で割って、移動速度を算出した。このときの印加電圧を前進は、2 から 5V の範囲で、後進は 5 から 8V の範囲で与えた。

b. 実験結果

実験結果を図 4.16(a), (b) に示す。図 4.16(a), (b) から、加振周波数を与えることにより、移動体が曲管内を前後進するのがわかった。前進の最大速度は、印加電圧が 5V で加振周波数が 85Hz のとき、約 74mm/s となり、後進は 8V のとき、235Hz で、最大速度は約 46mm/s となった。後進は、印加電圧が 4V 以下では停止したままであり、前進は 6V 以上では曲管の振動が大きくなり、安定した移動が困難となった。また、図 4.16(b) から、後進は印加電圧を大きくしていくと、ほぼ比例的に速度が大きくなるが、前進は印加電圧が 3V 以上では比例的に速度が大きくなるのではなく、95Hz では速度が落ちている。図 4.16(a), (b) は、細管を垂直にして、左右に管を振動させて移動体を上下移動した結果であり、図 4.16(a), (b) は、曲管を水平にして、上下に振動させて曲管の中を前後進の 2 方向した結果である。移動方向は違うものの、両方向とも加振機に与える印加周波数によって、移動方向が切り替わることがわかった。このことは、移動体を垂直管内の上下移動及び水平曲管内の前後移動を切り替えるのに、周波数の値を変えて印加することにより可能であることがわかった。

曲管内垂直移動実験

a. 実験方法

図 4.17 に、曲管内垂直移動実験の概略を示す。図 4.17 の状態で曲管を水平状態から 90° 傾けて、加振機を横に倒して曲管の \cap を上側にして、垂直方向に立てた片方の下端から 65mm のところをクランプで掴んで、曲管を左右方向に加振を与えたときの上下移動速度を求めた。この実験では、保持力を保つために、図 4.10 の黄銅板 A を 2mm だけ下端方向に長くし、その他の形状は図 4.10 と同じとし

た。実験方法は、クランプで掴んだ側の下端の管端の入口に移動体を停止させ、反対側の管端から出てくるまでの時間で、移動距離を割った値を移動速度とした。厳密に移動速度を考えると、移動体が曲管内を一定速度で移動していることを証明する必要があるが、目安として、単に移動距離を移動時間で割った値を概数として、移動速度とした。

b. 実験結果

実験は種々の値の印加周波数を与えてみたが、83Hzの周波数のときだけ上昇した。また、降下はどのような印加周波数を与えても移動しなかった。そのため、印加周波数を83Hzの値に固定して、印加電圧を変えて上昇速度だけを測定した。実験結果を図4.18に示す。図4.18から、7Vで移動速度は約50.7mm/s、8Vでは約51.0mm/sとなった。7Vまでは移動速度は印加電圧に比例して大きくなるが、7V以上は速度が飽和状態となった。これは7V以上にすると細管内の微振動が大きくなり、また、黄銅板の先端と管内壁面との接触部分が滑りやすくなったため、上昇速度が飽和したと考えられる。

4.4.3 考察

図4.10の移動体は、二つの黄銅板A、Bが互いに傾斜角度を持って接着されており、細管が振動して移動体が上端から加圧されると、黄銅板A、Bは弾性力によって下端の角度が広がる。黄銅板Bは、半田の塊が接着しているため、その重力により壁面に押し付ける力が大きく、摩擦力と釣り合って先端は滑らず、黄銅板Aは、黄銅板Bのように、重りが付いていないため、たわみやすく先端は滑りやすい。上端からの加圧力が小さいと、黄銅板Bの先端は、上端からの加圧力が小さいため保持されて動かず、黄銅板Aの先端は、たわみやすく滑りやすいため細管内壁面を後進方向に滑り、その連続的加振で移動体は後進する。

また、細管の加振をさらに大きくすると、黄銅板Bの弾性力によるたわみも大きくなり、先端を保持する摩擦力よりも、たわみによる壁面を滑る接線力が大きくなって前進方向に滑り、その連続的加振で移動体が前進すると考えられる。

移動体の速度が最大になるのは、その印加周波数のとき移動体の振動が大きくなり、移動速度が最大となったと考えられる。また、

第4章 ワイヤレス細管内移動体

直管と曲管とで最大速度の印加周波数が違うのは、細管の形状や長さの違いから、細管の共振振動が変わったためではないかと考えられるが、さらに解明する必要があると思われる。

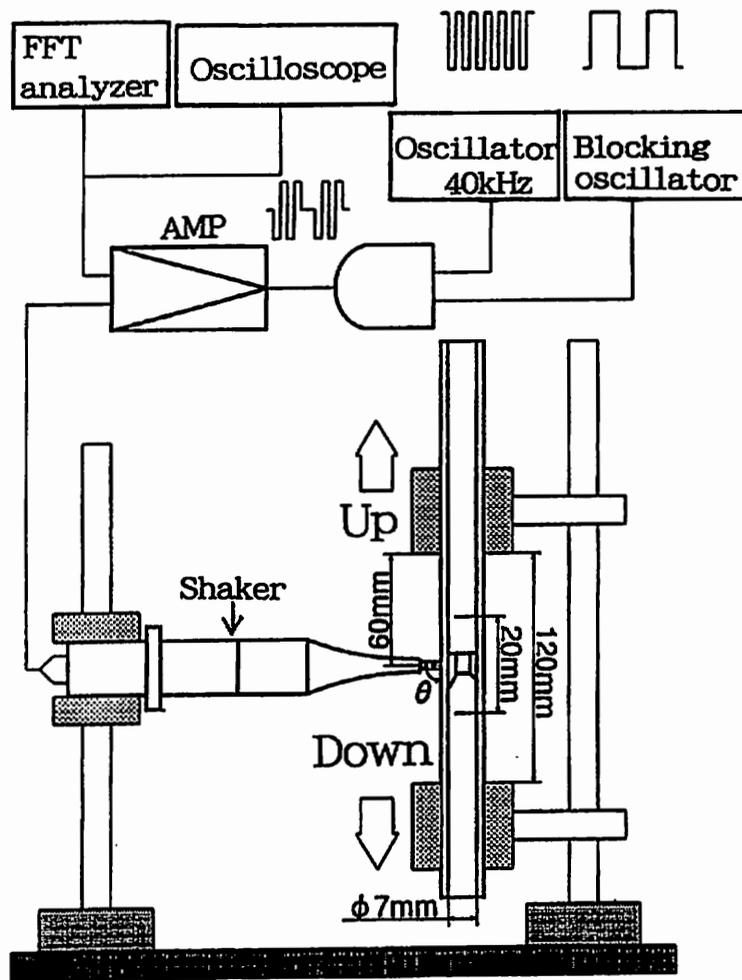


図 4.4: 圧電型加振機による細管内移動実験

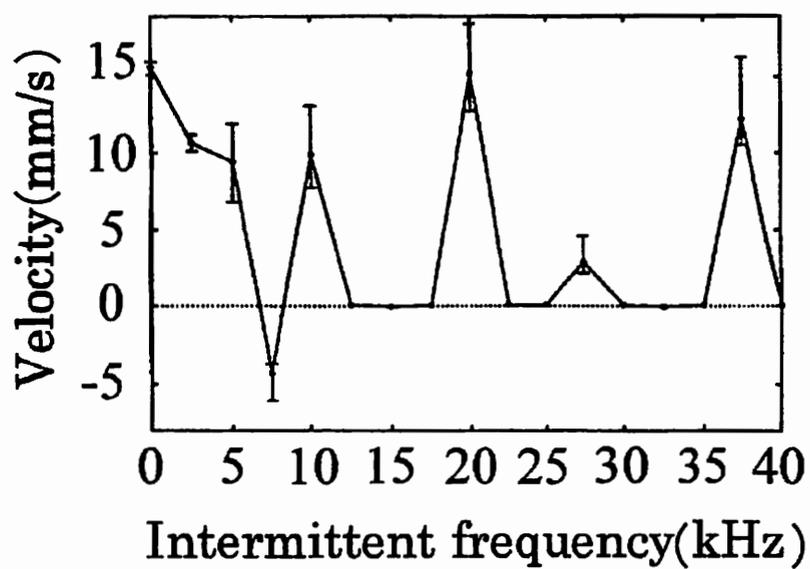


図 4.5: 間欠周波数と上下速度の関係

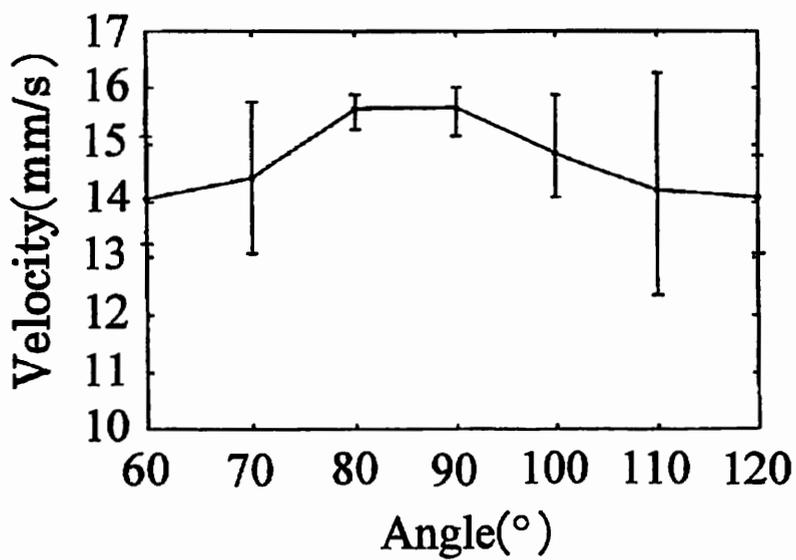


図 4.6: 接触角度と上昇速度の関係

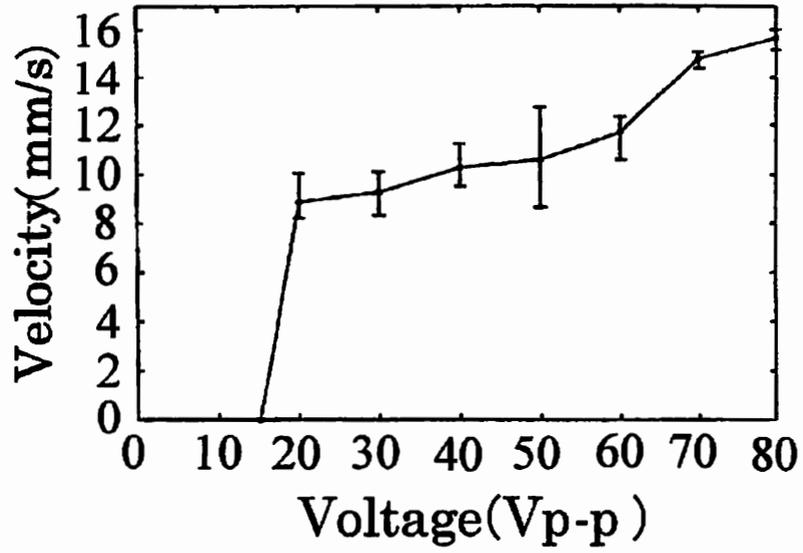


図 4.7: 印加電圧と上昇速度の関係

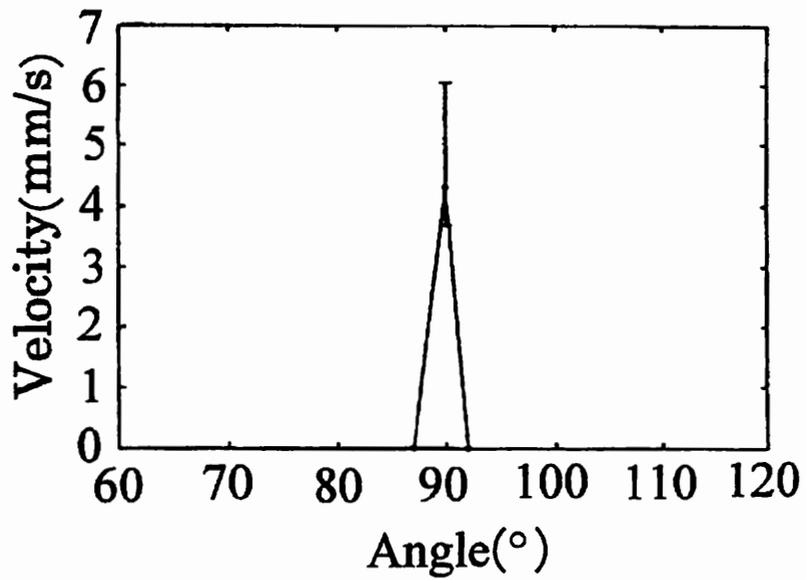


図 4.8: 接触角度と降下速度の関係

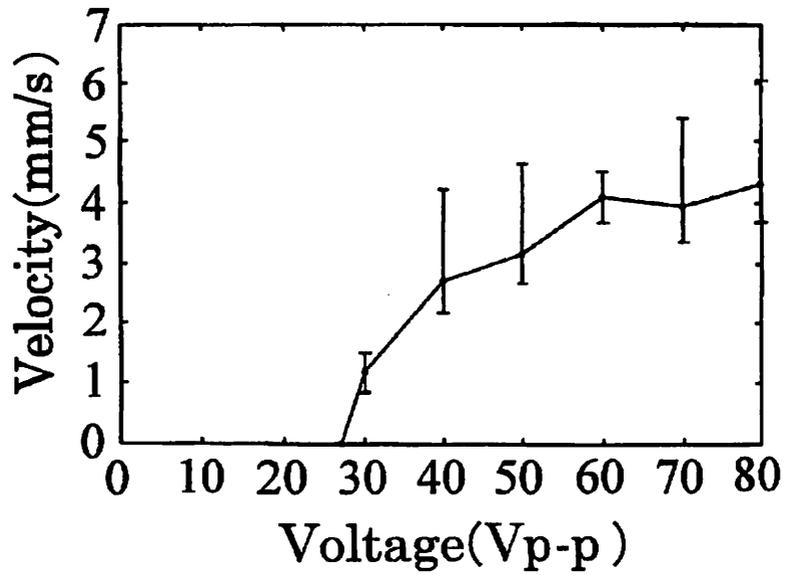


図 4.9: 印加電圧と降下速度の関係

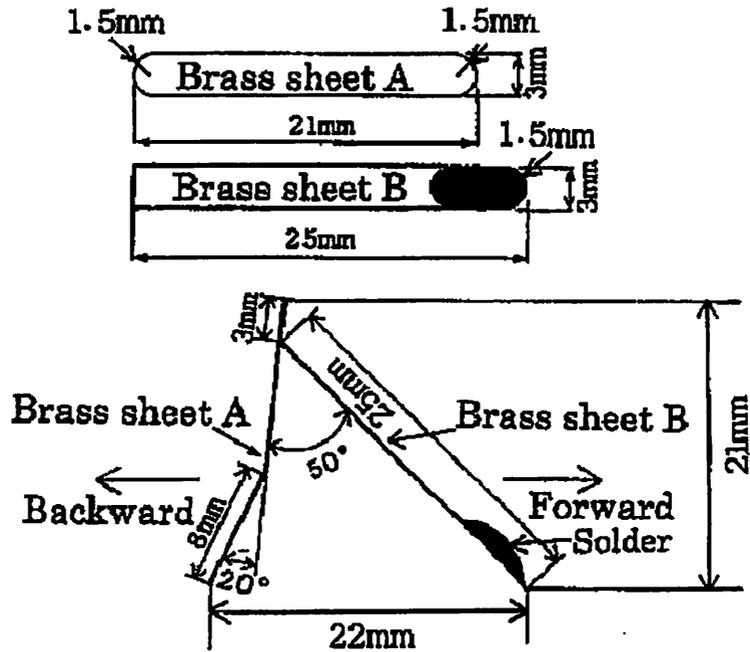


図 4.10: 移動体の構造

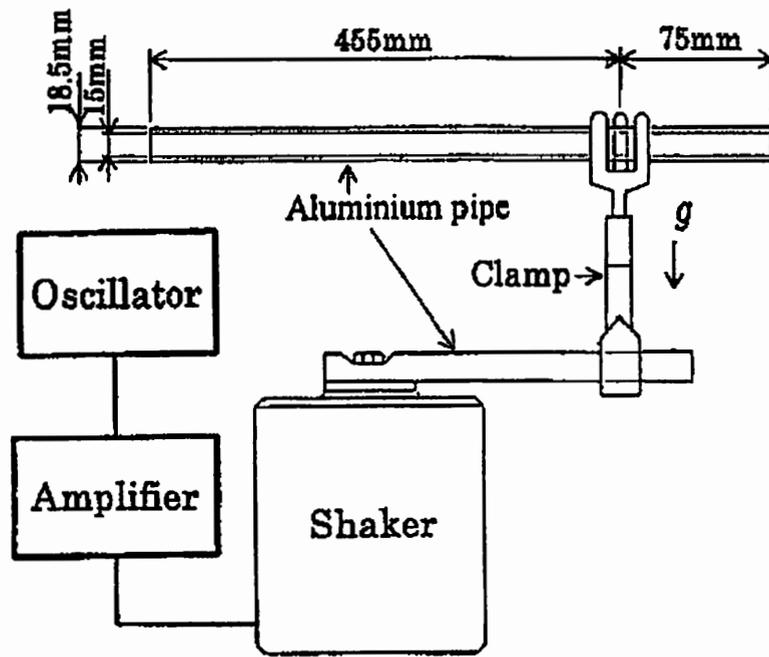
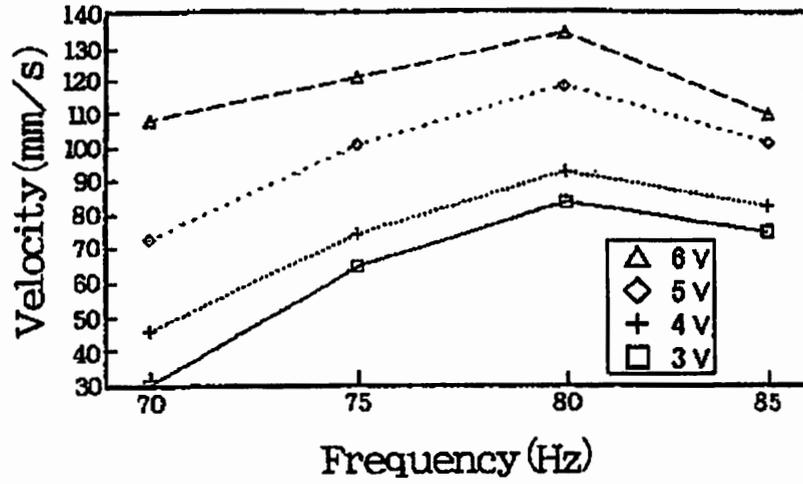
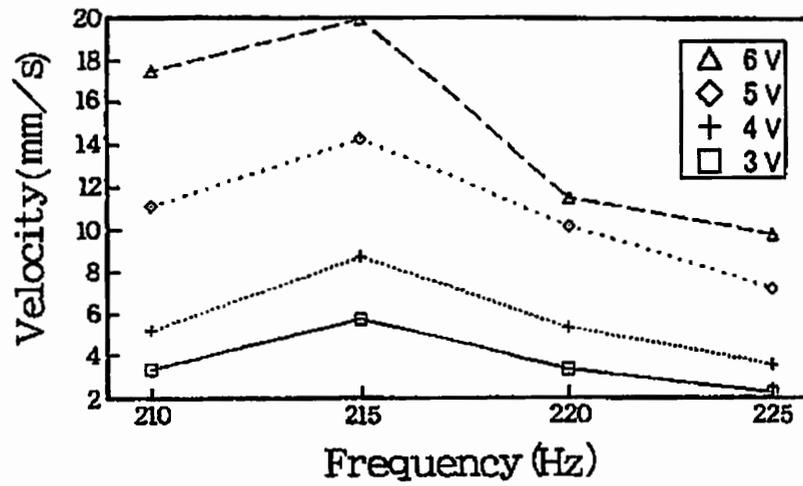


図 4.11: 動電型加振機による水平細管内移動実験



(a) Forward movement's velocity



(b) Backward movement's velocity

図 4.12: 印加周波数と移動速度 (水平細管)

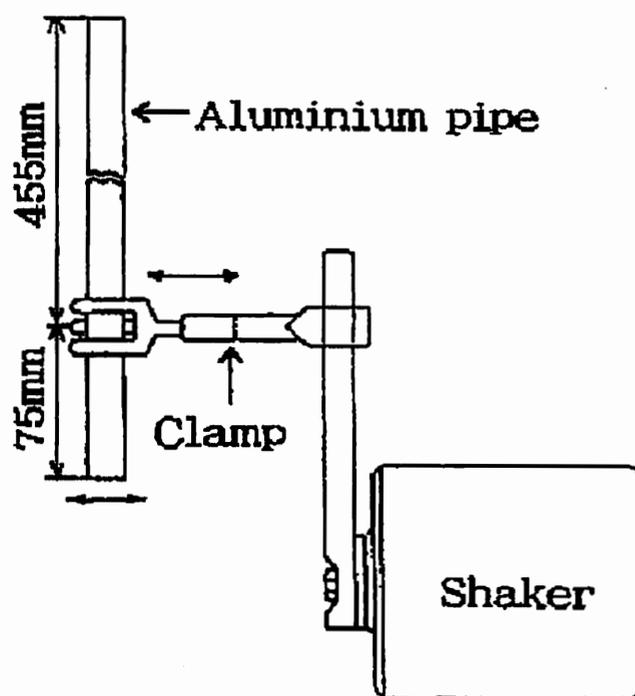
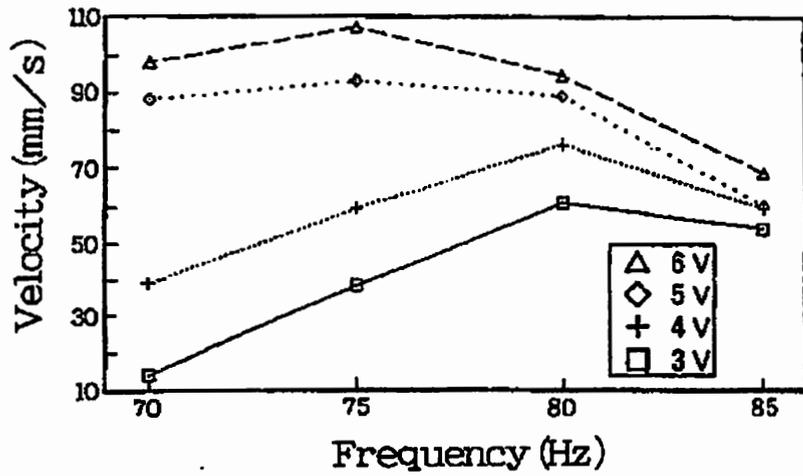
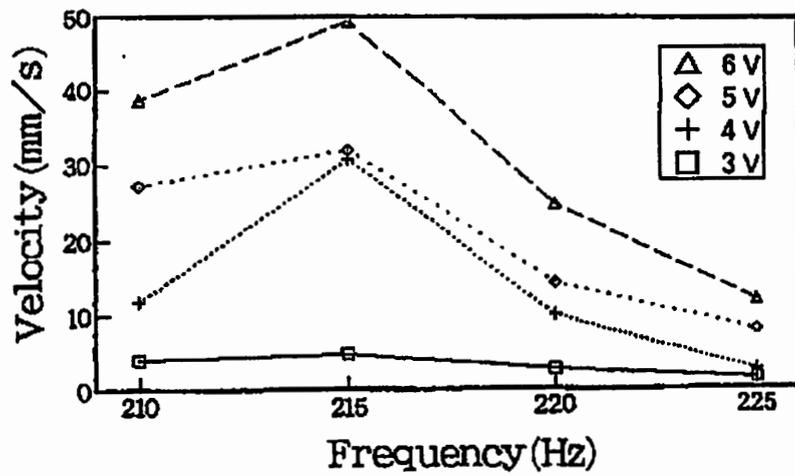


図 4.13: 垂直細管内上下移動実験装置



(a) Up velocity



(b) Down velocity

図 4.14: 印加周波数と移動速度 (垂直細管)

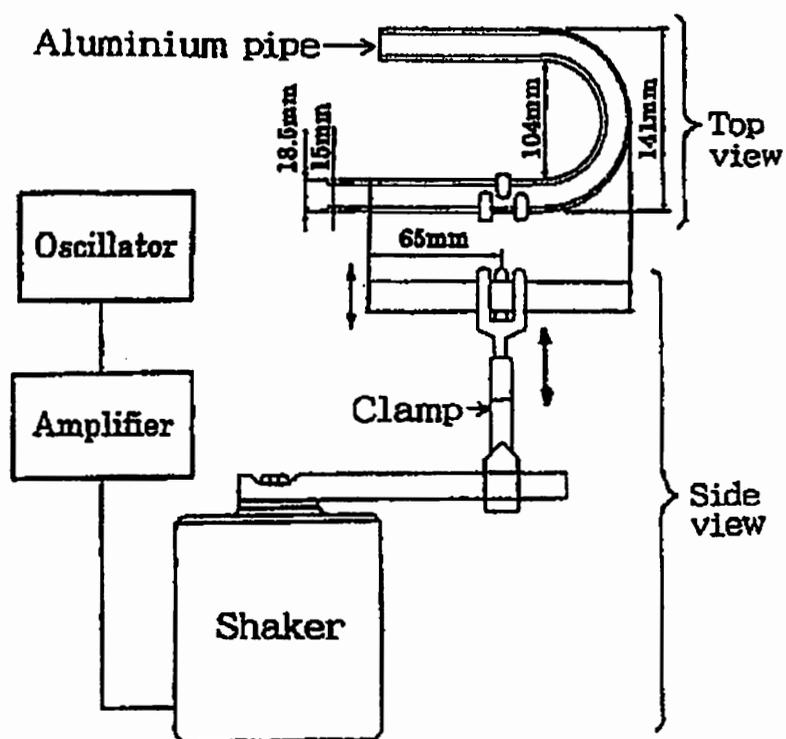
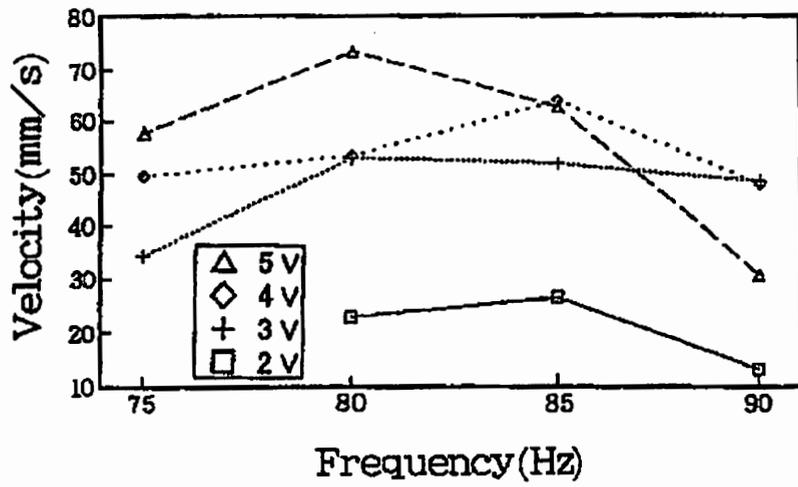
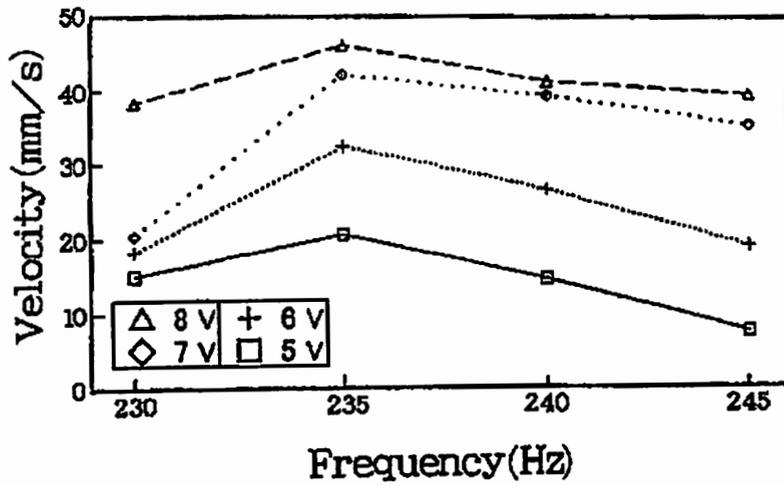


図 4.15: 曲管内水平移動実験装置



(a) Forward movement's velocity



(b) Backward movement's velocity

図 4.16: 印加周波数と移動速度 (曲管内水平移動)

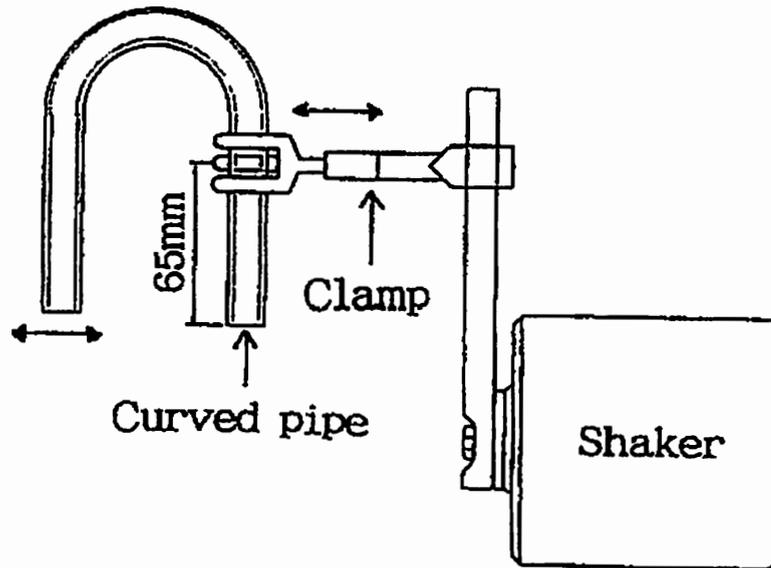


図 4.17: 曲管内垂直移動実験装置

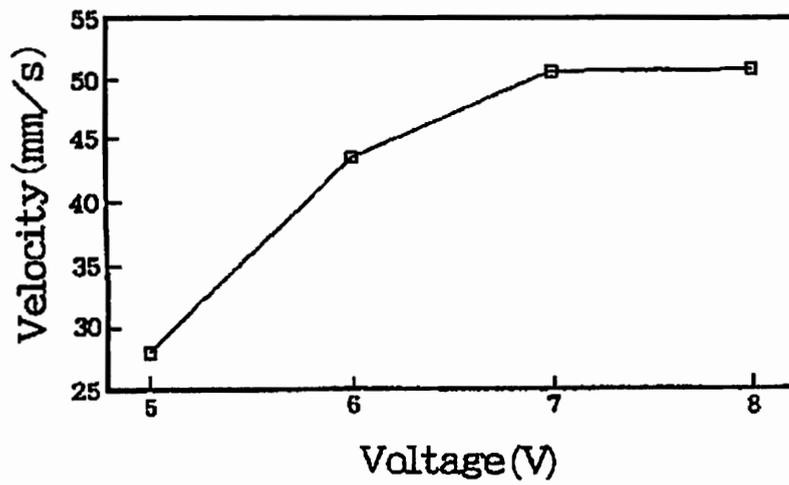


図 4.18: 印加電圧と印加電圧 (曲管内垂直移動)

第5章 細管内移動体の理論的説明

5.1 はじめに

本章では、両壁面間は固定された状態で、移動体自体を振動させてその推力で移動する方法を提案する。今回試作した移動体は、移動体の両側に傾斜角度を持つ弾性板を取付け、弾性板の先端は壁面に斜めに接触させる。弾性板に圧電アクチュエータを接続させてバイモルフ振動を起こし、弾性板をたわみ振動をさせて、その振動を推力として壁面間を移動する。

そして、試作した移動体の圧電アクチュエータの印加周波数や印加電圧の値を変えて、移動体が壁面間を前後進の2方向移動する実験を行い、その実験結果を報告する。

また、移動体の前後移動の解析を行うため、壁面に接触する弾性板の先端の挙動から、モデルを構築し、運動方程式を導出して、種々のパラメータを与えて数値計算を行い、計算結果からモデルの考察を行った。以下にその考察結果を述べる。

5.2 移動体についての理論的解析

5.2.1 移動体の構造

試作した移動体の構造を図 5.1 に示す。図 5.1a の圧電アクチュエータ (NTK 社製, EB-400-80MHz) は、長さ 40mm, 幅 8mm, 厚さ 0.53mm の大きさで、印加電圧を与えることによりバイモルフ振動をする。圧電アクチュエータは壁面方向に先端を R4mm で丸く削った、長さ 20mm, 幅 8mm, 厚さ 0.05mm のりん青銅板を図 5.1b のように取り付け、また、圧電アクチュエータの反対側は長さ 20mm, 幅 8mm, 厚さ 0.1mm の大きさのりん青銅板で圧電アクチュエータの保持用で、図 5.1c のように両側の圧電アクチュエータを一つに固定している。圧電アクチュエータの取り付け方法は、りん青

銅板の端を幅 2mm のツメを設けて折り曲げて、その中に圧電アクチュエータの端を挿入させて圧着固定させる。圧電アクチュエータの壁面側も同様に幅 2mm のツメを設けたりん青銅板で圧着固定している。圧電アクチュエータとりん青銅板とはショートを避けるために絶縁板が間に挟んである。移動体の片側 a, b, c の接続による全長は 65mm となる、また、りん青銅板の傾きの角度は自由に変更することができる。

圧電アクチュエータに印加周波数や印加電圧を与える方法は、図 5.2 に示すように、発振器から印加周波数を設定して方形波電圧を出力し、その信号を増幅器に入力して印加電圧を増幅する。そして、増幅された信号を、圧電アクチュエータの表裏両面にエナメル線を半田付けして、エナメル線を通して印加電圧を与える。電圧が印加されると、圧電アクチュエータに接続されているりん青銅板の先端は、円弧状に印加周波数の値でバイモルフ振動をする。

5.2.2 移動方法

移動体の移動は、図 5.3 で示すように、大きさが長さ 36mm、幅 10mm、厚さ 2mm のアクリル製の台座を持つ台車に、図 5.1 の移動体をビスで固定し、台車にはアクリル材質のコロを両側に左右対称に 2 個ずつ取り付け、幅 5mm の溝を設けたガイドレール上を前後移動する。なお、移動体の自重は、ガイドレール上を移動するアクリル材質の台車を含めると 10.9gf となる。また、実験では両壁面として厚さ 5mm のアクリル板を使用した。

移動方向は、図 5.3 のように、紙面の左側へ移動する方向を前進とし、その反対の右方向への移動を後進とする。

5.3 移動原理についての理論的解明

5.3.1 印加周波数と移動速度の関係

実験方法

圧電アクチュエータの印加周波数と移動速度の関係を求める実験を行った、移動体を停止させ、圧電アクチュエータの印加電圧を $60V_{p-p}$ に固定して、印加周波数を 100Hz から 450Hz まで変化させ、

移動体が前進または後進したときの印加周波数の値において、移動体が 10mm 移動したときの時間を計測して移動速度を求めた。そして、この実験を 3 回繰り返してその速度の平均値を求めた。

実験結果

実験結果を図 5.4 に示す。図 5.4 は、縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加周波数 (Hz) を表す。図 5.4 から、印加周波数の値を変化させると、移動体は不規則に前後移動することがわかる。図 5.4 の結果から、印加周波数が 295Hz のとき、前進速度が 2.24mm/s で最大となり、200Hz のとき、後進速度が最大で 2.93mm/s となった。グラフ上に移動速度の数値が示されていないところでは、その印加周波数のとき移動体が 10mm 以上移動しなかった。また、印加周波数が 450Hz 以上では移動体は移動しなかった。

5.3.2 印加電圧と移動速度の関係

実験方法

次に、圧電アクチュエータの印加電圧を変化したときの、移動体の移動速度の測定実験を行った。圧電アクチュエータの印加電圧を $0V_{p-p}$ から $60V_{p-p}$ まで $5V_{p-p}$ 刻みで電圧を大きくして、そのときの移動体が 10mm 以上移動したときの、移動時間を計測して移動速度を求めた。そして、この実験を 3 回繰り返して、その速度の平均値を求めた。

実験結果

実験結果を図 5.5 に示す。図 5.5 は、縦軸は移動速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表し、■印は、印加周波数が 200Hz の速度変化であり、●印は 270Hz の速度変化である。図 5.5 から、どちらの周波数においても、移動体は印加電圧が低い値のときには後進を示し、印加電圧を大きくしていくと、移動体は前進に切り替わり、印加電圧をさらに大きくしていくと、前進速度も大きくなる傾向となった。このことは、移動体は印加電圧を変化させることで、前後移動方向が切り替わり、移動速度の大きさも変化した。また、20V

以下の印加電圧では、移動体は移動しなかった。

5.3.3 移動解析と接触先端のモデル

本研究は、振動推進の分野に属する研究と考えられ、振動推進は、振動輸送と同様に振動応用技術の一環であり、物体自身に振動源を持たせ、その振動の非対称性と固体摩擦の非線形性を巧みに利用して、すべり面上を移動する方法を示す [75]。

本研究の移動体の移動解析について、図 5.1 の構造から簡単に図 5.6 のような形状と考え。図 5.6 は、 x 座標および y 座標を設け、移動体の質量を m とし、本体の両側に同じ長さの弾性板を傾斜角度を持たせて取り付け、平行な壁の間を移動する移動体とする。そして、弾性板の先端は壁面に接触して、そのたわみ振動により推力を得て移動する。解析しやすくするために、両側の弾性板と壁面との傾斜角度は同じ ($\alpha = \beta$) とする。

また、図 5.6 は図 5.2 と移動方向の向きが逆であるが、ここで、紙面の右側を前進方向とし、その反対方向を後進方向とする。

図 5.6 からさらに、弾性板の先端の挙動を明らかにするために、壁面との接触部分について図 5.7 のモデルを表す。図 5.7 は、壁面上に質量 m の物体が接触している状態で、図 5.7 のすべり方向を x 方向、壁面に垂直な方向を y 方向とし、物体の運動の各軸方向成分を x および y と表す。解析上、 x 軸および y 軸のそれぞれの方向に、

$$\begin{aligned} F_x &= A \sin \omega t \\ F_y &= B \sin(\omega' t + \tau) \end{aligned} \quad (5.1)$$

($\omega = 2\pi f$, $\omega' = 2\pi f'$, f, f' : 印加周波数, τ : 位相差)

となる正弦的な力が作用すると考える。ここで、物体と壁面との間に作用する摩擦力を R , 垂直反力を P , 物体に作用する外力を F_e とする。また、 ω および ω' は、 F_x および F_y の円振動数であり、 f と f' はその周波数成分である。各軸方向には、以下のような力が与えられ、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A \sin \omega t + R + F_e \quad (5.2)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = B \sin(\omega' t + \tau) + P \quad (5.3)$$

物体が壁面より跳躍しないとすると、 $y = 0$ となり、

$$P = -B \sin(\omega' t + \tau) \quad (5.4)$$

が得られる。すべり状態での摩擦力は、

$$R = -\mu(\operatorname{sgn}(\dot{x})B \sin(\omega' t + \tau)) \quad (5.5)$$

となる。ここで、 $\operatorname{sgn}(\dot{x})$ は、以下に示す。

$$\operatorname{sgn}(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & (\dot{x} > 0 \text{ のとき}) \\ 0 & (\dot{x} = 0 \text{ のとき}) \\ -1 & (\dot{x} < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

式(5.5)を式(5.2)に代入すると、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A \sin \omega t - \mu(\operatorname{sgn}(\dot{x})B \sin(\omega' t + \tau)) + F_e \quad (5.6)$$

となり、外力を $F_e = 0$ とすると、図5.7のモデルの運動方程式は、

$$m\ddot{x} + \operatorname{sgn}(\dot{x})\mu B \sin(\omega' t + \tau) - A \sin \omega t = 0 \quad (5.7)$$

となる [75]。式(5.7)の運動方程式を用いて、以下に数値計算を行った。

5.3.4 数値計算

印加周波数の変化による移動速度変化

5.3.1項での実験結果から、圧電アクチュエータの印加周波数を変化させると、移動体の移動方向や移動速度が変化することから、式(5.7)の運動方程式を用いて、 f および f' の印加周波数を変化させて、図5.7の物体が、移動方向や移動速度がどのように変化するかについて、以下に示すパラメータを与えて数値計算を行った。その計算結果のグラフを図5.8に示す。

A , B , m のパラメータは、実験上で圧電アクチュエータの印加電圧が $60V_{p-p}$ のとき、りん青銅板の先端の x および y 方向の荷重を測定すると、 A は約 9×10^{-3} kgf となり、 B は約 18×10^{-3} kgf となった。そこで、双方とも同じくおおよそ十分の一と設定した。また、質量 m の値は実際の移動体の自重の値とした。以後に示すパラメータの値は、全て同じパラメータの値である。

$$A = 0.1 \times 10^{-3} \text{ kgf}$$

$$B = 0.2 \times 10^{-3} \text{ kgf}$$

$$m = 10.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\tau = 0$$

ここで、弾性板の先端と壁面との傾斜角度での摩擦係数 μ の値は、実験と同じ傾斜角度 62° での実測値を用いた。 μ の値は、本来は弾性板がたわんだ角度での摩擦係数値で計算を行うべきであるが、たわんだ状態での摩擦係数の実際の実測が難しく、実験上においてたわみ角は小さいので、 62° での静摩擦係数の値とした。以下にその数値を示す。

$$\mu(62^\circ) = \begin{cases} 0.4 & (\dot{x} > 0 \text{ のとき}) \\ 0.0 & (\dot{x} = 0 \text{ のとき}) \\ 0.19 & (\dot{x} < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

図5.8のグラフは、横軸に式(5.7)の運動方程式の f と f' を同時に0から400Hzまで10Hzずつ印加周波数を大きくして、縦軸に移動方向や移動速度の変化を表した。図5.8から、印加周波数を変化させると、移動方向や移動速度が不規則に変化した。

これは実験より得た図5.4の結果と同じ性質を示すものであり、図5.7のモデルからも、印加周波数を変化させると、移動体が不規則に前後進することとなった。

印加電圧の変化による移動速度変化

圧電アクチュエータの印加電圧を変化させると、図5.5の実験から、移動体の移動方向や移動速度が変化することが得られたので、図5.7のモデルからも、式(5.7)の運動方程式を用いて数値計算を行った。ここで、圧電アクチュエータの印加電圧を変化させることは、式(5.1)の F_x と F_y の振幅 A 、 B を共に変化させることと同じであり、振幅 A 、 B を同時に変化させて計算を行った。また、 μ は 62° のときの値とした。その結果を図5.9に示す。

図5.9のグラフの横軸は、最初に A を $0.1 \times 10^{-3} \text{ kgf}$ とし、 B を $0.2 \times 10^{-3} \text{ kgf}$ として、 \times の倍数とした値である。また、 f と f' は、実際に実験で与えた数値であり、以後に示す f と f' も同じである。

縦軸に移動方向や移動速度の変化を示す。図 5.9 から、 A 、 B の振幅を同時に大きくしていくと、図 5.7 の物体は、始め後進を示していたのが前進に切り替わり、さらに振幅を大きくしていくと、前進の移動速度が大きくなる結果となった。

図 5.9 の結果は、実験結果の図 5.5 と同様な傾向となり、始め印加電圧が小さいときは、摩擦力に抑えられて前進できずにいるが、振幅が大きくなると、前進する力が摩擦力より大きくなり、移動体は前進に切り替わって、前進速度はさらに大きくなっていくことが、図 5.7 のモデルからも確認できた。

$$m = 10.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$f, f' = 270 \text{ Hz}$$

$$\tau = 0$$

傾斜角度の違いによる移動速度変化

図 5.6 の弾性板の傾斜角度が異なると、移動速度はどのように変化するか数値計算を試みた。傾斜角度が変化すると x 方向と y 方向の力の大きさの比率が異なり、例えば、傾斜角度が小さいと、 x 軸方向の力は大きく、 y 軸方向の力は小さくなる。逆に傾斜角度を大きくすると、 x 軸方向の力が小さく、 y 軸方向の力は大きくなる。このように傾斜角度の違いにより、 x 、 y 各軸方向の力の比率は異なり、この力の振幅比率の違いによる移動速度変化について、式 (5.7) の運動方程式から、以下に示すパラメータを与えて計算を行った。

また、傾斜角度が異なれば摩擦係数の値も変化するが [73]、摩擦係数の値を変えると振幅比率で変化しているのか、摩擦係数の違いで変化しているのかわからなくなってしまうため、 μ の値は 62° の値で計算した。

その結果を図 5.10 に示す。図 5.10 の横軸は A 、 B の振幅比率を表し、縦軸は移動速度を表す。図 5.10 は、横軸 A/B の値が 1 のときは $A = B$ であり、これは傾斜角度 45° となる。そして、 45° を境にして、 $A < B$ では移動速度は大きく、 $A > B$ では移動速度は小さい結果となった。

これは、傾斜角度が大きいときは、壁面を押し力が大きく、たわみ力も大きいので、移動する速度を大きくなり ($A < B$)、傾斜角度が

小さいと、壁面を押す力は小さく、たわみ力も小さいので ($A > B$), 移動速度は小さくなると推測される。

$$m = 10.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$f, f' = 270 \text{ Hz}$$

$$\tau = 0$$

摩擦係数の違いによる移動速度変化

移動体は、弾性板の傾斜角度が異なれば、壁面に対する先端の力の方向が変わり、みかけの摩擦係数の値も変化する [73]。摩擦係数の値が違えば、移動方向や移動速度がどのように変化するのかを調べてみた。μを62°と、29°での二つの傾斜角度の違いによる、それぞれの摩擦係数値で計算を行った。式(5.7)の運動方程式に以下に示すパラメータを与えて、計算した結果を図5.11に示す。

図5.11は、実線が傾斜角度が62°のときの変化であり、破線は29°のときの変化である。また、29°のときの静摩擦係数μの値を以下に示す。

図5.11から、62°と29°の両方とも、振幅A, Bを同時に大きくしていくと、双方とも後進から前進に切り替わり、さらに前進の移動速度が大きくなるという、同様の傾向となった。

しかし、実線は、図5.11の物体が前進するときに、前進を妨げる方向に摩擦係数0.4で摩擦力が働き、破線は0.35で働く。これは29°のほうが摩擦係数値が62°よりも小さく、そのため、物体は滑りやすく前進しやすい。62°はその反対に、29°よりも摩擦係数値が少し大きい分だけ、摩擦力により前進しづらいこと示している。このことは、図5.11から、破線のほうが振幅の小さい値で、後進から前進に早く切り替わったことを示していると思われる。

$$\mu(29^\circ) = \begin{cases} 0.35 & (\dot{x} > 0 \text{ のとき}) \\ 0.0 & (\dot{x} = 0 \text{ のとき}) \\ 0.23 & (\dot{x} < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$A = 0.1 \times 10^{-3} \text{ kgf}$$

$$B = 0.2 \times 10^{-3} \text{ kgf}$$

$$m = 10.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$f, f' = 270 \text{ Hz}$$

$$\tau = 0$$

5.3.5 移動原理と力学モデル

移動原理を解明するため、移動体の力学モデルを構築する。図5.12に、移動体の力学モデルを示す。図5.12の上側の図は、モデルを上方から見たものであり、下側の図はモデルを正面から見たものである。本モデルは、弾性板の伸縮による m_1 の接触壁面の反力を P_1 とし、 m_2 の接触壁面での反力を P_2 と仮定する。ここで、弾性板の長さを R_i とすると、 R_i は周期的に変化するとして、

$$R_i = r_i + A \cos \omega t$$

$$r_1^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2$$

$$r_2^2 = (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2$$

と考えられる。次に移動体本体と移動面との摩擦係数を μ_1 、弾性板先端と接触壁面との摩擦係数を μ_2 、 m_1 と M の弾性板のばね定数を k_1 とし、 m_2 と M の弾性板のばね定数を k_2 とする。 x 軸とばねとの角度をそれぞれ θ_1 、 θ_2 とする。

5.3.6 運動方程式

次に、運動方程式を求める。最初に運動エネルギーは、

$$T = \frac{M}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{m_1}{2} \dot{x}_2^2 + \frac{m_2}{2} \dot{x}_3^2 + \frac{M}{2} \dot{y}_2^2 + \frac{m_1}{2} \dot{y}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{y}_3^2 \quad (5.8)$$

となり，ポテンシャルエネルギーは，

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{k_1}{2}R_1^2 + \frac{k_2}{2}R_2^2 \\
 &= \frac{k_1}{2}(r_1^2 + 2r_1A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t) \\
 &\quad + \frac{k_2}{2}(r_2^2 + 2r_2A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t) \\
 &= \frac{k_1}{2}\{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2 \\
 &\quad + 2\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t\} \\
 &\quad + \frac{k_2}{2}\{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2 \\
 &\quad + 2\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t\}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

となる．ここで，粘性減衰による散逸関数は，

$$D=0$$

となり，外力は弾性板の振幅の変化と考え，外力の一般化力表示は壁面からの反力である P_1 と P_2 のみを考慮して，以下のようになる．

$$Q_{y1}=P_1$$

$$Q_{y3}=P_2$$

式(5.8)と式(5.9)より，ラグランジュアン L は以下のようになる．

$$\begin{aligned}
 L &= T - U \\
 &= \frac{M}{2}\dot{x}_1^2 + \frac{m_1}{2}\dot{x}_2^2 + \frac{m_2}{2}\dot{x}_3^2 + \frac{M}{2}\dot{y}_2^2 \\
 &\quad + \frac{m_1}{2}\dot{y}_1^2 + \frac{m_2}{2}\dot{y}_3^2 \\
 &\quad - \frac{k_1}{2}\{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2 \\
 &\quad + 2\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t\} \\
 &\quad - \frac{k_2}{2}\{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2 \\
 &\quad + 2\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}A \cos \omega t + A^2 \cos^2 \omega t\}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

一般的なラグランジュの運動方程式は、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_i} = Q_i \quad (5.11)$$

であり、始めに x_1 についてのラグランジュの運動方程式は、式(5.11)から、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial x_1} = 0 \quad (5.12)$$

ここで、式(5.10)より、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1}\right) = \frac{d}{dt}(M\dot{x}_1) = M\ddot{x}_1 \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ -\frac{k_1}{2}(-2x_2x_1 + x_1^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{k_2}{2}(-2x_3x_1 + x_1^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2} \right\} \\ &= k_1(x_2 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad + k_2(x_3 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.14)$$

ゆえに、式(5.13)、式(5.14)を式(5.12)に代入して、重力による摩擦を考慮すると、 x_1 に関しての運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_1 &= k_1(x_2 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad + k_2(x_3 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad - \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \mu_1 (M + m_1 + m_2) g \end{aligned} \quad (5.15)$$

ここで、 g は重力加速度、 $\operatorname{sgn}(\dot{x}_1)$ は \dot{x}_1 の値によって変わる関数で、以下のように定義する。

$$\operatorname{sgn}(\dot{x}_1) = \begin{cases} 1 & (\dot{x}_1 > 0 \text{ のとき}) \\ 0 & (\dot{x}_1 = 0 \text{ のとき}) \\ -1 & (\dot{x}_1 < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

次に x_2 についてのラグランジュの運動方程式は、式 (5.11) より、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_2} = 0 \quad (5.16)$$

ここで、式 (5.10) より、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) = \frac{d}{dt} (m_1 \dot{x}_2) = m_1 \ddot{x}_2 \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_2} &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ -\frac{k_1}{2} (x_2^2 - 2x_1x_2 + 2A \cos \omega t \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}) \right\} \\ &= -k_1(x_2 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.18)$$

式 (5.17)、式 (5.18) を式 (5.16) に代入し、摩擦について考慮すると、質量 m_1 の壁面からの反力は P_1 であり、摩擦係数を μ_2 とすると、 x_2 についての運動方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_2 &= -k_1(x_2 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad - \mu_2 P_1 \end{aligned} \quad (5.19)$$

次に x_3 についてのラグランジュの運動方程式は、式 (5.11) より、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_3} = 0 \quad (5.20)$$

ここで、式 (5.10) より、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_3} \right) = \frac{d}{dt} (m_2 \dot{x}_3) = m_2 \ddot{x}_3 \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_3} &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ -\frac{k_2}{2} (x_3^2 - 2x_1x_3 + 2A \cos \omega t \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}) \right\} \\ &= -k_2(x_3 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.22)$$

式(5.21), 式(5.22)を式(5.20)に代入し, 摩擦について考慮すると, 質量 m_2 の壁面からの反力は P_2 であり, 弾性板の左右の接触角度は同じなので, 摩擦係数は μ_2 とすると, x_3 についての運動方程式は以下のようになる.

$$m_2 \ddot{x}_3 = -k_2(x_3 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} - \mu_2 P_2 \quad (5.23)$$

次に y_1 についてのラグランジュの運動方程式は, 式(5.11)より,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_1} = Q_{y_1} \quad (5.24)$$

ここで, 式(5.10)より,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_1} \right) = \frac{d}{dt} (m_1 \dot{y}_1) = m_1 \ddot{y}_1 \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial y_1} &= \frac{\partial}{\partial y_1} \left\{ -\frac{k_1}{2} (-2y_1 y_2 + y_1^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2} \right\} \\ &= -k_1 (y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.26)$$

また,

$$Q_{y_1} = P_1 \quad (5.27)$$

であるから, 式(5.25), 式(5.26), 式(5.27)を式(5.24)に代入して, y_1 の運動方程式を求めると,

$$m_1 \ddot{y}_1 = -k_1 (y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} + P_1 \quad (5.28)$$

次に y_2 についてのラグランジュの運動方程式は, 式(5.11)より,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_2} = 0 \quad (5.29)$$

ここで、式(5.10)より、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_2}\right) = \frac{d}{dt}(M\dot{y}_2) = M\ddot{y}_2 \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial y_2} &= \frac{\partial}{\partial y_2} \left\{ -\frac{k_1}{2}(-2y_1y_2 + y_2^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2} \right. \\ &\quad \left. -\frac{k_2}{2}(-2y_3y_2 + y_2^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2} \right\} \\ &= k_1(y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad + k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.31)$$

式(5.30)、式(5.31)を式(5.29)に代入して、 y_2 の運動方程式は、

$$\begin{aligned} M\ddot{y}_2 &= k_1(y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad + k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.32)$$

最後に y_3 についてのラグランジュの運動方程式は、式(5.11)より、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_3}\right) - \frac{\partial L}{\partial y_3} = Q_{y_3} \quad (5.33)$$

ここで、式(5.10)より、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_3}\right) = \frac{d}{dt}(m_2\dot{y}_3) = m_2\ddot{y}_3 \quad (5.34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial y_3} &= \frac{\partial}{\partial y_3} \left\{ -\frac{k_2}{2}(-2y_3y_2 + y_3^2 + 2A \cos \omega t) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2} \right\} \\ &= -k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.35)$$

また,

$$Q_{y_3} = P_2 \quad (5.36)$$

であるから, 式(5.34), 式(5.35), 式(5.36)を式(5.33)に代入して, y_3 の運動方程式を求めると,

$$m_2 \ddot{y}_3 = -k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} + P_2 \quad (5.37)$$

式(5.15), 式(5.19), 式(5.23), 式(5.28), 式(5.32), 式(5.37)において, 運動方程式を導出した. ここで, y 軸は固定されていると仮定すると,

$$y_1 = y_2 = y_3 = 0$$

すると, 一回微分, 二回微分は,

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_2 = \dot{y}_3 = \ddot{y}_1 = \ddot{y}_2 = \ddot{y}_3 = 0$$

式(5.28), 式(5.37)は,

$$\begin{aligned} P_1 &= k_1(y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ P_2 &= k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.38)$$

が求まる. 上式を式(5.19), 式(5.23)に代入して以下の式となる.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_2 &= -k_1(x_2 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad - \mu_2 k_1(y_1 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_3 &= -k_2(x_3 - x_1) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \\ &\quad - \mu_2 k_2(y_3 - y_2) \left\{ 1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (5.40)$$

また, $y_1 - y_2 = y_3 - y_2 = h$ とすると, 式 (5.15), 式 (5.39), 式 (5.40) は,

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x}_1 &= k_1(x_2 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad + k_2(x_3 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad - \text{sgn}(\dot{x}_1)\mu_1(M + m_1 + m_2)g \\
 m_1\ddot{x}_2 &= -k_1(x_2 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad - \mu_2 k_1 h \left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 m_2\ddot{x}_3 &= -k_2(x_3 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad - \mu_2 k_2 h \left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + h^2}}\right\}
 \end{aligned}$$

となる. ここで次式を当てはめると,

$$\begin{cases} m_1 = m_2 = m \\ k_1 = k_2 = k \\ \theta_1 = \theta_2 = \theta \\ x_2 = x_3 = x_2 \end{cases}$$

運動方程式は以下の2式になる.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x}_1 &= 2k(x_2 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad - \text{sgn}(\dot{x}_1)\mu_1(M + 2m)g \tag{5.41}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x}_2 &= -k(x_2 - x_1)\left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \\
 &\quad - \mu_2 k h \left\{1 + \frac{A \cos \omega t}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + h^2}}\right\} \tag{5.42}
 \end{aligned}$$

5.3.7 移動シミュレーション

前項において, 運動方程式を導いたので, 次に移動シミュレーションの方法を示す. 移動シミュレーションは, 積分きざみ $\Delta t =$

$(2\pi)/(128\omega)$ に設定し、4次の *Runge-Kutta-Gill* 法を用いる。

また、シミュレーションで用いるパラメータや初期値は以下のようにした。

$$M=15.4\times 10^{-3}\text{kg}$$

$$m=0.1\times 10^{-3}\text{kg}$$

$$h=49.5\times 10^{-3}\text{m}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = 500\text{Hz}$$

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

$$A=1.0\times 10^{-3}\text{m}$$

$$\theta = 60^\circ$$

$$\mu_1 = \begin{cases} 0.12 & (\dot{x}_1 > 0 \text{ のとき}) \\ 0.0 & (\dot{x}_1 = 0 \text{ のとき}) \\ 0.16 & (\dot{x}_1 < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0.1 & (\dot{x}_2 > 0 \text{ のとき}) \\ 0.0 & (\dot{x}_2 = 0 \text{ のとき}) \\ 0.01 & (\dot{x}_2 < 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

初期値は、以下のとおりとする。

$$x_1(0) = \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0$$

$$x_2(0) = \frac{h}{\tan \theta}$$

摩擦係数 μ_1 と μ_2 は、それぞれ移動体本体の速度 \dot{x}_1 と、壁面と接触している部分の質量 m の速度 \dot{x}_2 の値によって、変化するようにしてある。移動シミュレーションは、ばねの A の値を $70\sim 210\times 10^{-6}$ の範囲で変化させて、移動体の x_1 軸方向の移動速度変化を求めることができる。

5.4 弾性板の斜め接触による摩擦の特性

細管内移動体の特徴は、移動体本体に接続されている弾性板がほとんど細管内壁面に対して、斜めに接触していることである。弾性板が斜めに接触することは弾性板が壁面に垂直に接触するのと摩擦係数の値が異なる。この摩擦係数が違うことについて、図5.13を示して説明する。

図5.13は、止め片を斜め接触の剛体棒によって支えた止めの基本モデルである。いま、簡単のために底辺の摩擦力は無視して、止め片との接触部の摩擦力だけについて計算してみる。ワークを拘束する力の最大値を F とすれば、

$$F = \mu N \quad (5.43)$$

である。ここで、 N は止め片とワークとの間に作用する法線力である。 N は押し付ける力 P と等しいとは限らない。 N の値を求めるため、剛体棒支点 O に関して、モーメントの釣り合い式を作ってみる。

$$Pl \sin \theta = Nl \sin \theta - \mu Nl \cos \theta \quad (5.44)$$

となる。ここで l : 剛体棒の長さ、 θ : 剛体棒が法線となす角 (法線から進行方向に向かって計る)。これから、

$$N = \frac{P}{1 - \mu \cot \theta} \quad (5.45)$$

となり、したがって、

$$F = \mu N = \frac{\mu}{1 - \mu \cot \theta} P \quad (5.46)$$

となる。いま、

$$\mu'_1 = \frac{\mu}{1 - \mu \cot \theta} \quad (5.47)$$

とにおいて、

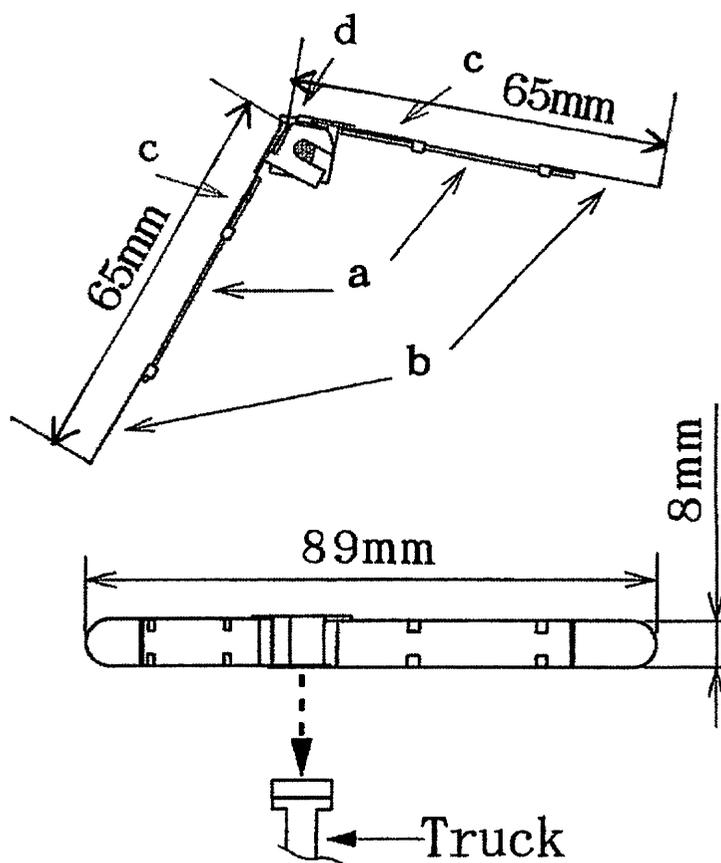
$$F = \mu'_1 P \quad (5.48)$$

となる。この μ'_1 のことを「見かけの摩擦係数」と呼ぶ。式(5.47)は、 θ の値によって、 μ'_1 は μ より大きくなることも、小さくなることもある。また、逆方向に進むときは、 θ の符号が逆になる [73]。

また、実際に摩擦がスティックスリップ現象を起こしている場合、静摩擦係数はスティック時間によって変化し、一般にはスティック時間が長いほど大きくなることが知られている。この原因についてはさまざまなケースが考えられるが、定性的には接触面での凝集の進行や油膜の厚さの変化などが理由として挙げられる。時間に対する静摩擦係数の変化の様子は、例えば、加藤らは、

$$\mu = \mu_s - (\mu_s - \mu_k)e^{-\gamma T_1^m} \quad (5.49)$$

なる時間効果の実験式を示している。ここで、 γ 、 m は時間効果の程度を表す量であり、材料や環境条件によって異なった値をとる。 T_1 はスティック時間である [63]。



- a : Piezoelectric actuator
- b,c : Phosphor bronze plate
- d : Attaching part

図 5.1: 移動体の構造

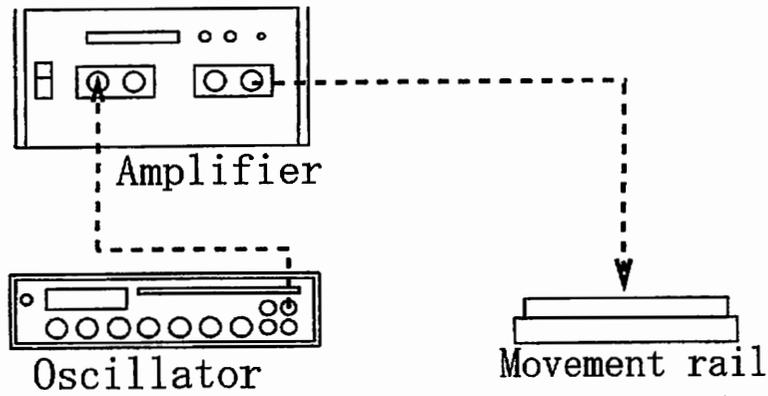


図 5.2: エネルギー供給システム

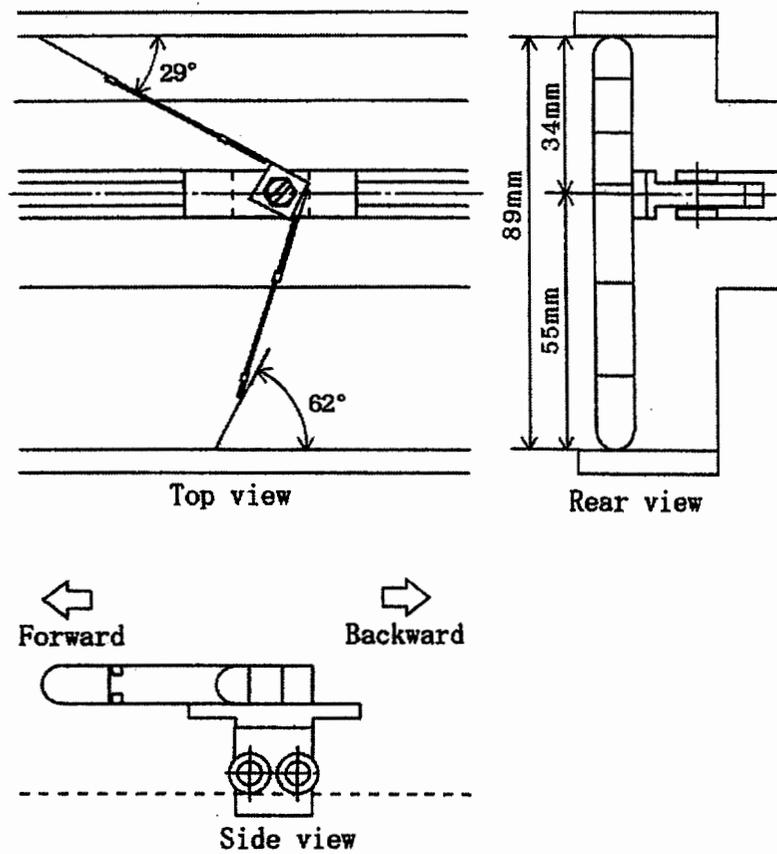


図 5.3: 実験システム

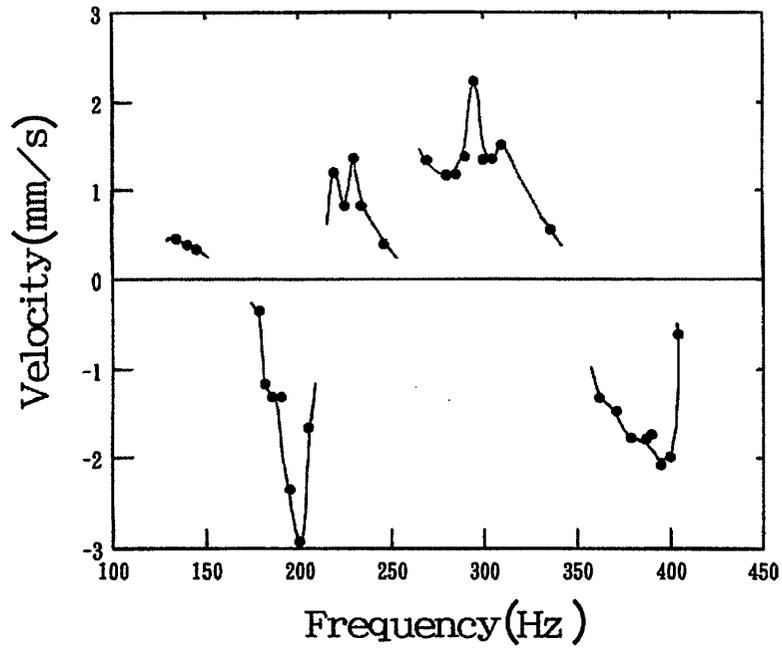


図 5.4: 印加周波数と移動速度の関係

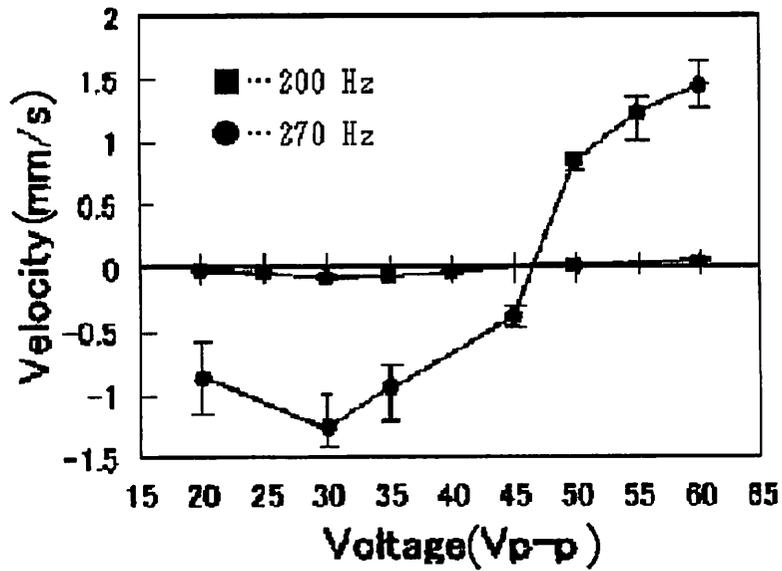


図 5.5: 印加電圧と移動速度の関係

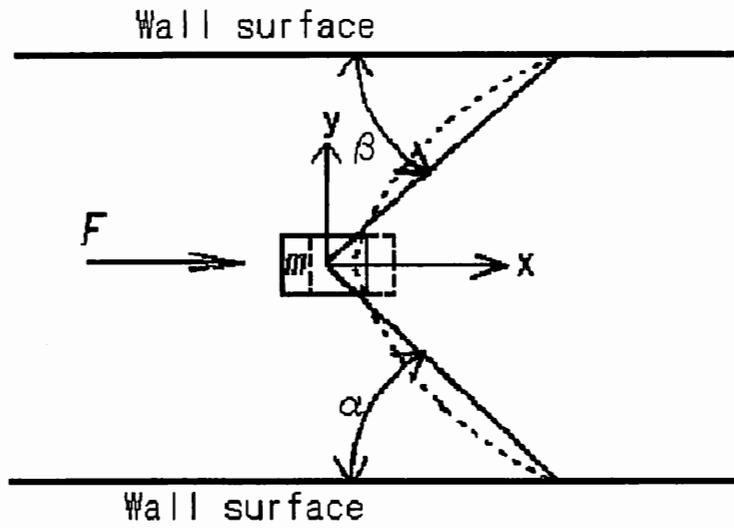


図 5.6: 移動体の基本構造

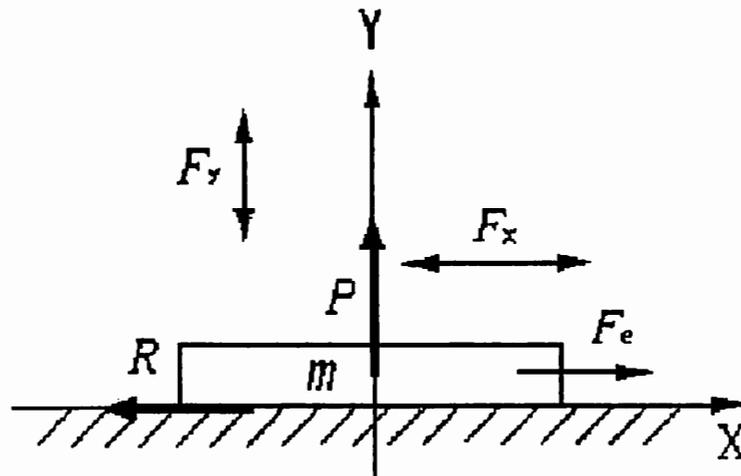


図 5.7: 壁面との接触先端のモデル

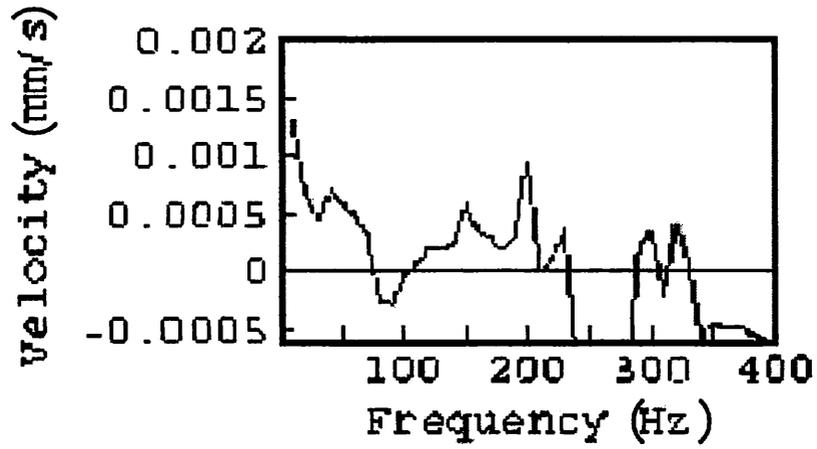


図 5.8: 印加周波数と移動速度の関係

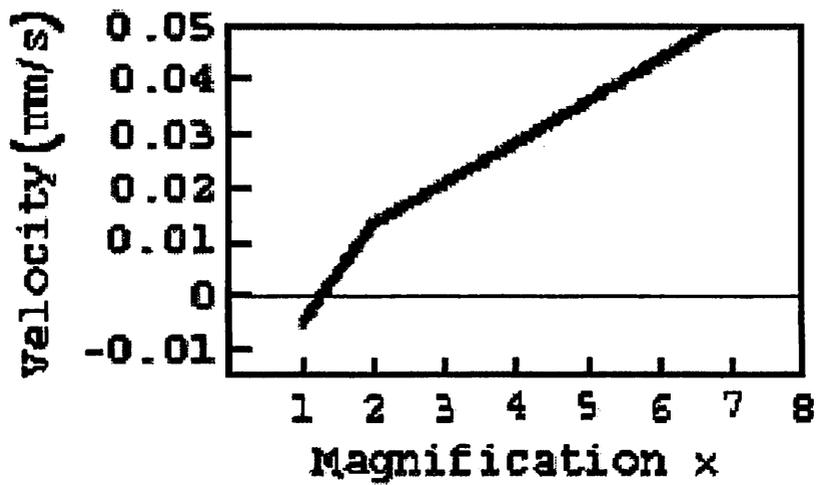


図 5.9: 印加電圧と移動速度の関係

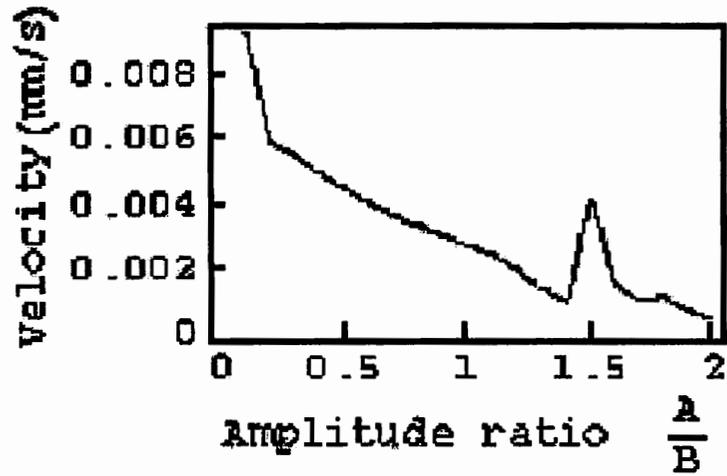


図 5.10: 傾斜角度と移動速度の関係

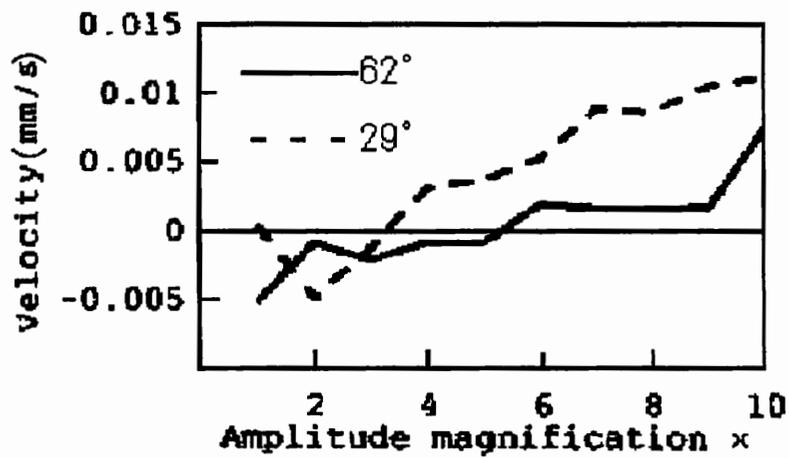


図 5.11: 摩擦係数と移動速度の関係

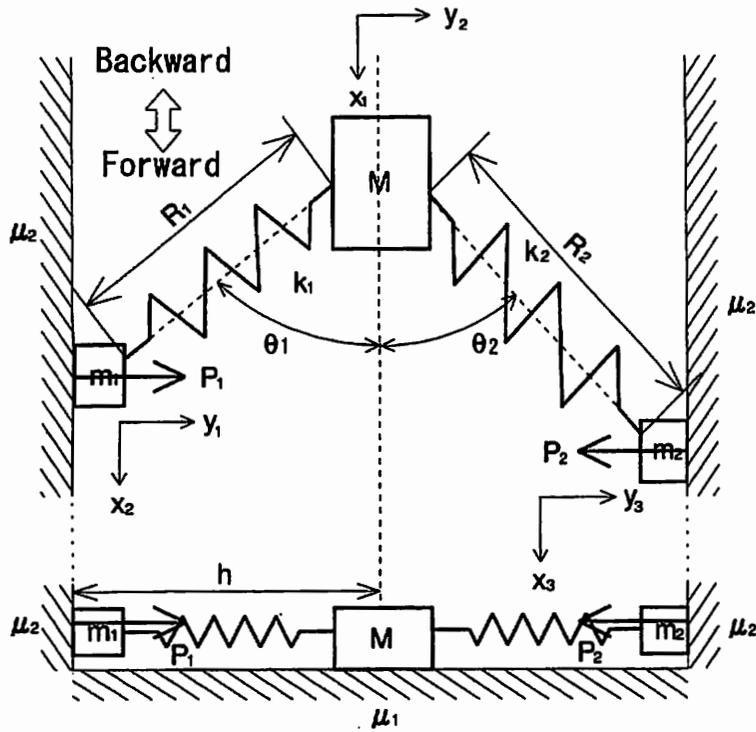


図 5.12: 力学モデル

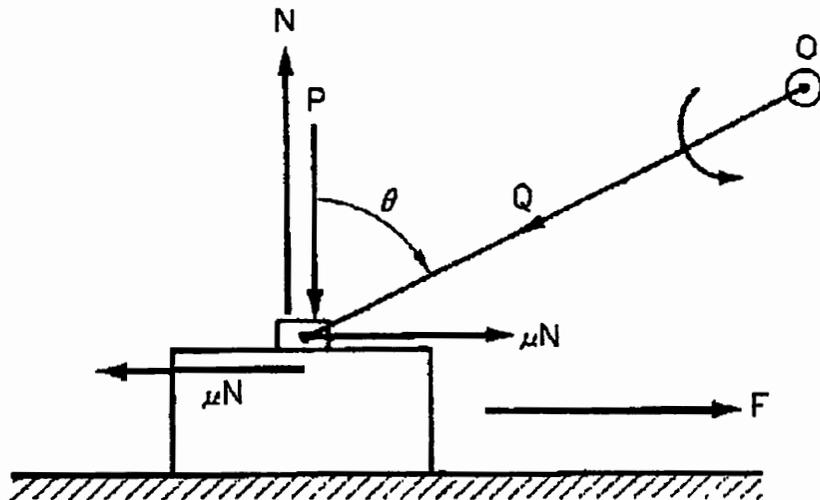


図 5.13: レバーをもつ止めのモデル

第6章 細管内移動体のカプセル輸送 としての応用

6.1 はじめに

細管内移動体について、どのような方面に活用して良いのか検討を行った結果、パイプラインのカプセル輸送として応用が可能ではないかと考え、以下にカプセルの試作を行い、移動実験を行ってその応用可能性について検討を行った。

6.2 パイプライン輸送について

固体粒子をパイプラインによって輸送する方法は、鉄道輸送、トラック輸送、ベルトコンベア輸送などと同様に輸送方法として高く評価されているのみならず、他の輸送方法にはない多くの利点を有することが認められている。特に環境破壊などの公害が少なく、輸送経路の占有面積が少なく、配管の位置についても選択性が大きく、特に、物資の流通のために必要な土地の入手が困難な場合には、これらの特徴を有する輸送方法は、今後大いに利用されることが期待されている。また一方、資源を産出し、輸出している国では、土地が広大なためと鉱山という特殊な立地条件のために利用できる輸送手段が少なく、すでにこのパイプライン輸送が輸送手段として用いられている。

パイプライン輸送には、固体粒子を水などの液体を搬送流体として輸送するスラリー輸送、空気を搬送流体とする空気輸送、あるいは液中に空気を加えることによって固体粒子を輸送するエアリフト輸送、固体粒子が液体と直接に接して推力を受け輸送されるものと、固体粒子をカプセルに入れ、パイプラインの中を水力あるいは風力によって輸送するカプセル輸送とがある [68]。

6.2.1 カプセル輸送の特徴

カプセル輸送は、スラリ輸送の欠点を改良した方法であり、スラリ輸送と同様の長所を有しているが、反面スラリ輸送にない欠点もある。カプセル輸送の特長を以下に述べると、

- (1) 連続運転が可能であり、大量輸送ができる。
- (2) 長距離輸送が可能である。
- (3) 運転において、環境破壊、騒音、粉じん飛散などの公害が少ない。
- (4) パイプラインは、道路、鉄道、河川などの既存のものと交差し、経路は比較的選定しやすい。
- (5) 水力カプセル輸送では、急傾斜でも輸送できる。
- (6) 輸送は天候の影響を受けない。
- (7) 完全な自動運転方式がとれる。
- (8) 群れを嫌う物も送れる。
- (9) 使い捨てのカプセルを用いることにより、一方向配管とすることができる。
- (10) スラリ輸送ができないような粗大粒子や単体を輸送できる。
- (11) 粉粒体の粒径を粉砕機や篩分機などによって調整する必要がない。
- (12) 粉粒体が輸送中に破壊、摩滅及び変質するなどの心配がない。
- (13) 付着性の強い粉粒体でも容易に輸送できる。
- (14) パイプラインの磨耗、腐食が少ない。

などの特長があるうえ、さらに、輸送容器自体は移動せず、内部の輸送物自体が移動するシステムであるため、船舶、鉄道、自動車などの容器自体が移動する輸送システムに比べて、衝突、転覆、墜落、沈没といった交通事故の危険を避けることができる。地下埋設物のパイプラインは他の物体による衝突・加撃、気温の変化、日光の直射、雨や風の激しい台風に対しても影響を受けないし、地震に対しても高質な管材の利用や溶接技術の長足な進歩により耐震性は飛躍的に向上している。そのため、「安全性」や「信頼性」は確固たるものになっているし、カプセルに入る物ならどんな物でも送れるという利点がある [68]。

次に、欠点を述べると

- (1) 一般に、輸送に用いたカプセルを元に戻すための配管が必要となる。

- (2) 空気カプセルでは、輸送経路の勾配に制限がる。
- (3) パイプラインの途中で故障、事故があるとき、全パイプラインを停止させなければならない。
などがある [68].

6.2.2 カプセル輸送の分類

現在実用化されているカプセル輸送には、大別して水力式と空気力式の2方式がある。これらは輸送媒体(水や空気)の供給方法の違いによって、圧送式とジェットポンプ式に分けられる。

圧送式はパイプラインの入口にポンプまたはブロワを設置し、ここで加圧された水または空気をパイプラインの中に送り込んでカプセルを押し流す方式であり、この場合にはカプセルを加圧されたパイプライン中へ投入するためのロッキングステーションがパイプラインの入口部分に設けられる。パイプライン中の圧力はその入口部で最高値になり、下流へ行くほど小さくなる。

また、ジェットポンプ式では、パイプラインの途中にジェットポンプ(ブースタポンプ、ブースタブロア)をいくつか設置し、間接的にパイプライン中に水流または空気流を生じさせる。各ジェットポンプの部分では、パイプライン中の流体の一部が抜き出されて加圧されたのち、ジェットノズルを介してパイプライン中に噴射される。したがって、ジェットポンプの直前で負圧、直後では正圧となり、パイプラインに沿って正圧と負圧が繰り返され、この際に生じる流体の流れによってカプセルが運ばれる。

空気式の装置の場合、ビルディング内部で文書輸送に用いられるエアシュータのようなごく小型のものを除き、一般にカプセルには車輪が設けられている。水力式の場合には、カプセルを密閉することによってカプセルの水中での見かけ比重を水の比重に近い値に選ぶことができるので、カプセルに車輪がなくてもカプセルを比較的容易に輸送することができる。したがって、水力式はかなり大型のものでも、車輪付カプセルのみならず車輪なしカプセルが用いられる。車輪なしカプセルの形状は一般に球型または茶封状の容器が用いられる。

このほかにも被輸送物の粉粒体そのものを球や円筒状に成型してカプセルとし、空カプセル返送のためのパイプラインを無くして片

第6章 細管内移動体のカプセル輸送としての応用

道輸送による設備費の低減を図る試みもなされている。車輪なしカプセルでは一般に軽量の粉粒体貨物の輸送に適しており、車輪付カプセルは重量の大きい大量の貨物を比較的長距離まで輸送するのに適しており、なお、水力式で用いられる水は、カプセル輸送用パイプラインと空カプセルの返送用パイプラインを交互に、循環して流速されるので、両パイプラインとその両端部に設置される水槽に供給した水量だけでカプセル輸送装置を運転することができ、水はほとんど補充する必要はない。

また、水力カプセル輸送装置と空気カプセル輸送装置を比較した場合を述べると、

- (1) 水力カプセルは、急傾斜を含む輸送ライン、とくに垂直ラインでも、水平ラインと同様にカプセルを輸送することができる。空気カプセルはパイプラインの傾斜角度が 6° 以上になると輸送が困難となってくる。
- (2) 浮力の作用を有効に利用すれば、輸送用動力をかなり節減することができる。
- (3) カプセルの速度が小さいので、(a) 走行中に生ずる騒音が小さい。(b) カプセルの必要台数は多くなる。水力カプセルの速度は $1.0 \sim 1.5\text{m/s}$ 、空気カプセルの速度はその約10倍)。
- (4) 水力カプセルはカプセルの水密性が必要であり、カプセルの蓋のシール方法には工夫を要する [55]。

6.2.3 カプセル輸送の今後の課題

水力カプセル輸送システムと空気カプセル輸送システムには一長一短があり、したがって、それぞれの長所を最大限に活かされるような地形及び用途などの範囲をあらかじめ設定しておき、この設定基準に基づいて輸送システムの選定することが望ましい。この適用範囲を設定する上で目安になる事項をあげれば、以下のとおりである。

また、各種のカプセル輸送システムについて、特徴及び適合する用途などを比較して示す。いずれのシステムも、最近の研究開発がかなり活発に行われるようになってきた。しかし、現在はまだ、カプセル輸送のコストが在来の輸送方式によるコストに比してやや高

い水準にある。したがって、カプセル輸送システムの実用化を促進するためには、輸送コストの低減化対策研究がぜひとも必要である。次に、このための研究課題を列挙すると、

- (1) パイプライン中におけるカプセルの充てん率の向上のために
 - (a) カプセル供給装置の高性能化による輸送能力の向上
 - (b) パイプライン中を走行中のカプセルの間隔制御技術の向上
 - (c) 到着ステーションに集中したカプセルの分離技術の向上
- (2) カプセル走行効率の向上対策
- (3) カプセルの製作コストの低減化対策と耐久性の向上対策
 - (a) 水力カプセルにおいては走行速度が小さい(1.0~1.5m/s)ので、パイプライン中のカプセルの間隔が小さくなり、多数のカプセルが必要になる。したがって、カプセルの製作コストの低減対策が重要な課題である。
 - (b) 空気カプセルにおいては走行速度が大きい(10~15m/s)ので、カプセルの車輪の耐久性、とくにタイヤの摩損対策が必要な課題である。また、カプセルの衝突による破損対策も重要である。
- (4) カプセルハンドリング装置のコスト低減対策(カプセルの供給・排出速度を高めて高能率化するほど、カプセルの発進・到着ステーションにおけるカプセルハンドリング装置のコストが全体コストに占める割合が一般に大きくなる。)[55]

以上述べたように、カプセル輸送装置は、現在ではベルトコンベア及び鉄道などの在来の輸送装置に比して一般に輸送コストがやや高くなるといわれており、技術向上による輸送コストの低減が必要である。しかし、カプセル輸送の研究はまだ緒についたばかりであり、大幅な性能向上及びコスト低減の余地が残されている。また、カプセル輸送装置はパイプライン輸送装置が持っている一般的な特徴のほかに多くの長所をもっており、原材料から加工製品に至るまで適用可能な分野は非常に広いので、今後の発展が大いに期待される。

6.2.4 カプセルの移動方法

本研究は、水や空気を輸送媒体として使ったカプセル輸送ではなく、管端からの超音波放射による細管内カプセル輸送方法と輸送媒体として始めて振動を使って細管を加振してカプセルを輸送させる方式である。超音波放射によるカプセル輸送は超音波放射力を利用したカプセル輸送方法であり、細管を掴んで加振させる方法は、発振器から細管を加振するための加振周波数パルスを出力し、そのパルス信号を増幅器で電力増幅する。増幅した信号を加振機に入力して、加振機から加振力を発生させ、細管を接続して加振する装置である。

6.3 管端からの超音波放射による細管内移動カプセル

本研究では、超音波を用いた新しい少量輸送タイプの細管内カプセル移動技術の研究開発を行っており、その途中経過において、外部から超音波を細管内に与えることにより、カプセルを水平管内を前進移動させる方法を開発した。それらの方法は、管端から超音波を細管内に放射させ、その放射圧によってカプセルを前進させる方法である。

本節において、始めに細管内を移動するカプセルの構造を示し、カプセルの移動速度測定実験を行ったので、その結果を示す。また、カプセルの重量を重くして移動距離を測定して、カプセル輸送能力に関する実験を行った。さらに、超音波送波器に印加する電圧波形や細管の振動波形を計測して、振動の性質から移動原理の考察を行った。そして、二つのカプセル移動方法の比較を行ったので、それらの結果を報告する。

6.3.1 カプセルの構造

本研究で製作したカプセルの構造を図6.1に示す。図6.1は、直径3.5mm、長さ5.0mmのポリプロピレン製円筒の片端に、厚さ25 μ m、直径6.0mmのアルミニウム円板を接着剤で接着した。もう一方の片端には、厚さ30 μ m、幅3mm、折り曲げた状態での長さ6.9mmのりん青銅板を接着剤で接着した。りん青銅板の上部側は、円筒軸から100°の角度で曲げてあり、下部側は、円筒軸の垂直方向から

48°の角度で曲げてある。本カプセルの自重は約31mgである。

この構造は、細管内でカプセルが前後移動するために考案された構造で、りん青銅板の形は、細管を加振したときに、管内壁面に斜めに接触している先端が振動し、そしてりん青銅板が振動し、その振動でカプセル本体が振動して移動する推力を得るための形である。アルミニウム円板は、細管内に放射される超音波の波動のエネルギーをできるだけ多く受波するために、細管内径に近い直径の金属円板とした。また、本節での実験には、すべて図6.1のカプセルを使用した。

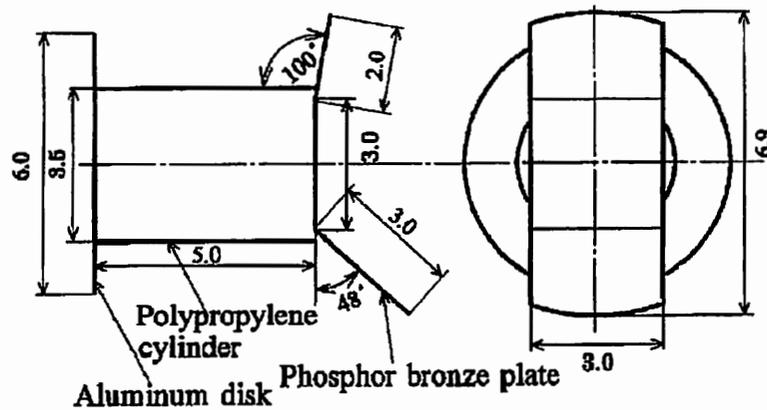


図 6.1: カプセルの構造

管端からの超音波放射によるカプセル移動実験装置

実験装置の概略を図6.2に示す。本論文で実験に使用した細管は、すべて内径7mmの透明ガラス直管で、図6.2のように、細管を治具で水平方向に固定し、左側管端に超音波送波器（以後は送波器と呼ぶ）を設置する。実験に使用した送波器は空中超音波センサの送信用（村田製作所製，MA40E7S）で、送波器に印加する信号は、まず、発振器から方形波の40kHzの高周波信号を出力し、その信号をバースト波[58]出力させるため、別の発振器から間欠パルスを与えてバースト波信号に変換する。バースト波された信号は、アンプで電圧増幅されて送波器に与える。送波器から超音波を放射してカプセルを移動させる装置である。

なお、カプセルの移動方向は、図 6.2 に示すように、送波器側に移動する方向を後進方向とし、細管内を超音波が放射される右方向を前進方向とする。

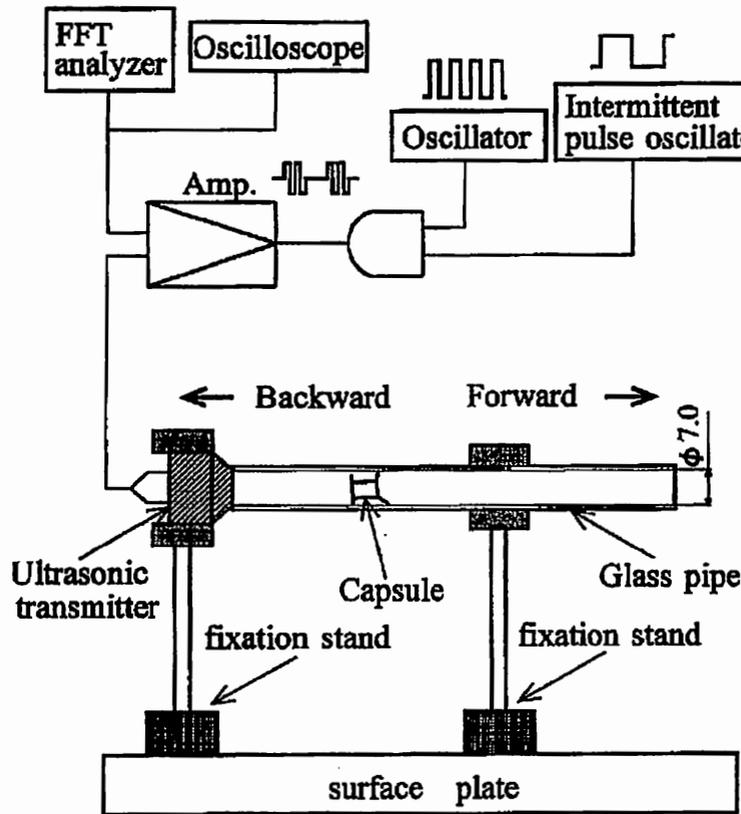


図 6.2: 管端からの超音波放射によるカプセル移動実験装置

6.3.2 細管内の超音波放射によるカプセル移動

超音波の放射圧については、平成 14 年度の機論 [59] において、細管内に超音波を放射してカプセルを移動させた実験データを示し、その移動推力に超音波の放射力が影響していることを述べたものであるが、前述の機論 [59] では、使用した超音波の送波器が、40kHz の連続した超音波放射をする送波器であり、本研究のように、バースト波による断続的な超音波放射 [60] をする送波器での実験は行っていなかった。そこで、超音波の連続放射とバースト波による断続放射によるカプセル移動速度の比較を行った。

6.3.3 超音波の連続放射とパースト波断続放射の比較

実験方法は、細管と送波器を同軸方向にして、送波器と左側管端との間を1mmにおいて固定する。カプセルはアルミニウム円板側を送波器側にして、細管の左側管端から20mmの初期位置に停止させ、超音波を細管内に放射して、カプセルが50mm移動した時間を計測し、移動距離と計測時間から前進速度を算出した。このとき送波器の印加電圧を $50V_{p-p}$ とし、間欠パルスを与えない40kHzの超音波の連続放射と、間欠パルスの周波数を5Hzから65Hzまでの範囲で5Hz間隔で変化させたパースト波による断続放射での、二つの方法による前進速度測定を行い、それを5回繰り返してその平均値を求めた。その結果を図6.3に示す。図6.3は、縦軸は速度(mm/s)、横軸は間欠周波数(Hz)で、連続放射による前進速度測定値は、図6.3の横軸に数値がない左端で示す。また、グラフ内の縦幅の実線は、各測定点でのばらつきの程度を表す。これ以後のグラフの図においても同様に、縦幅の実線は、測定値のばらつきの程度を表す。

図6.3から、超音波を連続放射したときのカプセルの前進速度は、パースト波での最大速度（間欠周波数が45Hzのとき）の約3倍速い結果が得られた。

このことは、常に連続的に超音波を細管内に放射するほうが、パースト波による断続的放射より、カプセルの前進速度が大きいことがわかった。また、間欠周波数を大きくしていくと、徐々に前進速度が小さくなる傾向となった。そして、間欠周波数を80Hz以上にすると前進しなくなった。これは、超音波を断続で放射したり、断続回数を多くすると、超音波の放射圧が小さくなるためと考えられる。

6.3.4 超音波の連続放射による印加電圧と前進速度の関係

実験を始める前に、送波器の印加電圧 V と出力音圧 P の関係を調べた。その結果を表1に表す。表1から、印加電圧を大きくすると、送波器からの出力音圧も大きくなることがわかった。これは、印加電圧を大きくすると、送波器の中にある圧電セラミックスの振動の振幅が大きくなり、そのため音圧も大きくなると考えられる。

次に、超音波の連続放射による送波器の印加電圧と前進速度の関係を調べた。実験は、細管と送波器を同軸方向にして、送波器と左

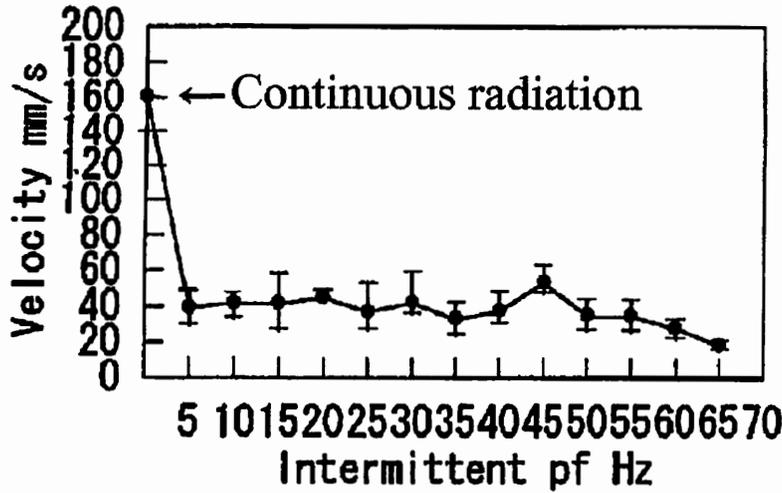


図 6.3: 連続放射と断続放射の実験結果

側管端との間を 1mm にしてそれらを固定する。カプセルは、アルミニウム円板側を送波器側にして、細管の左側管端から 20mm の初期位置に停止させ、40kHz の超音波を細管内に連続放射して、カプセルが 50mm 移動した時間を測定し、移動距離と時間から前進速度を算出した。このとき、印加電圧を $25V_{p-p}$ から $65V_{p-p}$ の範囲を $5V_{p-p}$ 間隔で速度を測定し、それを 5 回繰り返して前進速度の平均値を求めた。その結果を図 6.4 に示す。図 6.4 は、縦軸は速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。

図 6.4 から、送波器の印加電圧を大きくすると、前進速度も大きくなった。これは、印加電圧を大きくすると、送波器の出力音圧が大きくなり、そのため、細管内の超音波の放射圧が大きくなって、カプセルを押し出す力が大きくなり、前進速度も大きくなったと考えられる。

表 6.1: 印加電圧と出力音圧の関係

$V(V_{p-p})$	65	60	55	50	45
$P(Pa)$	1027	980	943	862	806
$V(V_{p-p})$	40	35	30	25	
$P(Pa)$	732	653	562	466	

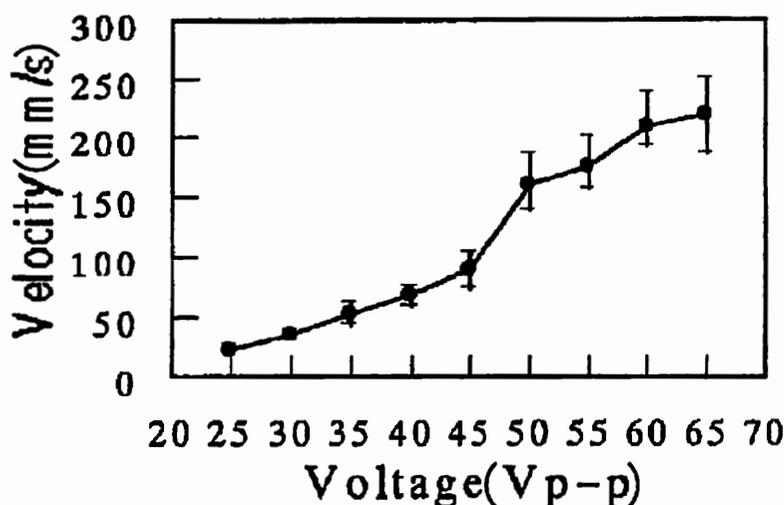


図 6.4: 印加電圧と前進速度の関係

超音波の連続放射による印加電圧と最大前進距離

カプセルの重量を重くして最大前進距離を調べた。実験は、送波器と細管を同軸方向にして、送波器と左側管端との間を 1mm おいて両方を固定する。カプセルはアルミニウム円板側を送波器側にして、細管の左側管端から 40kHz の超音波を細管内に連続放射して、カプセルを最大前進移動させ、細管の左側管端からカプセルが停止した距離までを測定した。このとき、印加電圧を 25V_{p-p} から 65V_{p-p} の範囲を 5V_{p-p} 間隔で測定し、それを 3 回繰り返して最大前進距離の平均値を求め、その結果を図 6.5 に示す。このときのカプセルの重量は 75mg である。図 6.5 は、縦軸は最大前進距離 (mm)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。

図 6.5 から、印加電圧を大きくすると、ほぼ比例して最大前進距離も大きくなることがわかる。これは、印加電圧を大きくすることにより、超音波の出力音圧が大きくなり、それだけカプセルを大きく押し出す力が発生して、前進距離が大きくなったと考えられる。

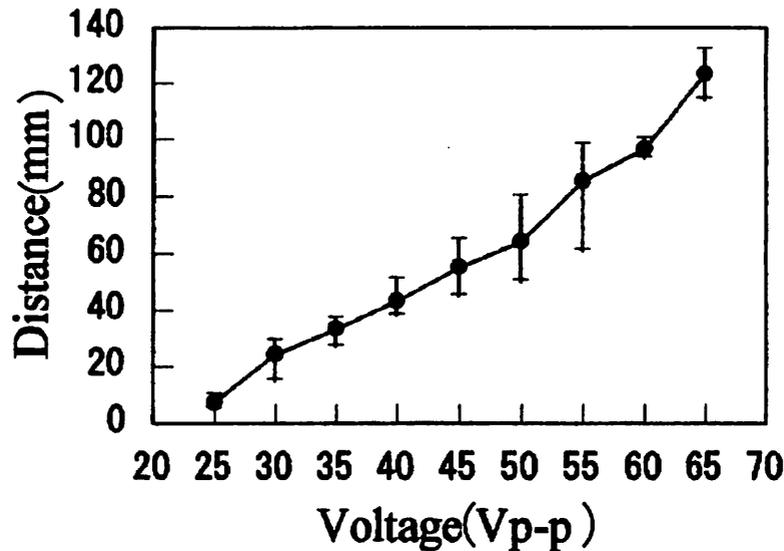


図 6.5: 印加電圧と最大前進距離の関係

細管内放射時の印加電圧波形

FFT アナライザを使用して、40kHz の超音波を細管内に連続放射をしているときの、送波器の印加電圧 $60V_{p-p}$ の波形を計測した。その計測波形を図 6.6 に表す。図 6.6 は、縦軸は印加電圧 (V)、横軸は時間 (ms) を表す。

図 6.6 の印加電圧波形を見ると、波形自体は周期的で振幅もほぼ一定で規則的な波形をしている。これは連続放射時の送波器の $60V_{p-p}$ 以外の印加電圧値においても、同様な波形を示した。

6.4 細管の加振によるカプセル移動

6.3 章で述べた移動方法は、細管内に超音波を放射してカプセルを移動させる方法であるが、この方法はカプセルを一方向だけ移動する方法であり、カプセルは前進するだけで、そのままでは後進させることはできない。

カプセルを細管の中で前後進させる利点は、例えば、細管が詰まってカプセルが移動中に停止したとき、カプセルを後進させて回収することが可能であり、または、個人専用のパイプラインを持つこと

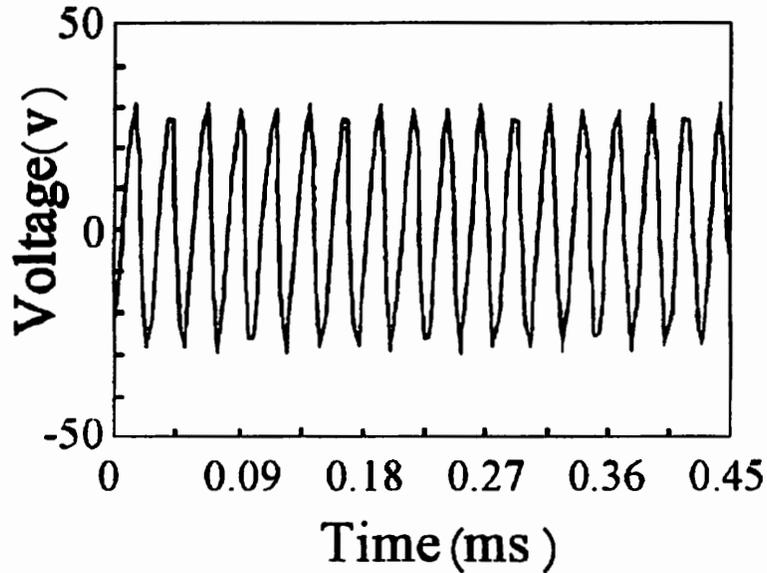


図 6.6: 時系列波形

ができ、カプセルが1本の細管の中を往復して運搬作業ができるなどの利点があり、カプセル輸送の活用範囲が大きくなる。

そこで、カプセルを細管の中で前後移動させるため、新しい方法として、細管の加振による、カプセルを前後移動させる方法を考案した。以下に、その移動方法についての実験結果と考察を述べる。

6.4.1 前進移動

細管の加振による前進移動について、実験は、送波器と細管を同軸方向にして送波器の放射面と細管の左側管端を接触させる。カプセルは、りん青銅板側を送波器側にして、細管の左側管端から20mmの初期位置に停止させ、送波器から超音波振動を細管に接触伝達振動させ、細管の振動でカプセルが前進方向に向かって、50mm移動した時間を測定して、移動距離を測定時間で割って前進速度を算出した。このとき、間欠パルスの周波数は159.4kHzにして、印加電圧25V_{p-p}から65V_{p-p}までの範囲を5V_{p-p}間隔で測定を行い、それを5回繰り返して前進速度の平均値を求めた。その結果を図6.7に示す。図6.7は、縦軸は前進速度(mm/s)、横軸は印加電圧(V_{p-p})

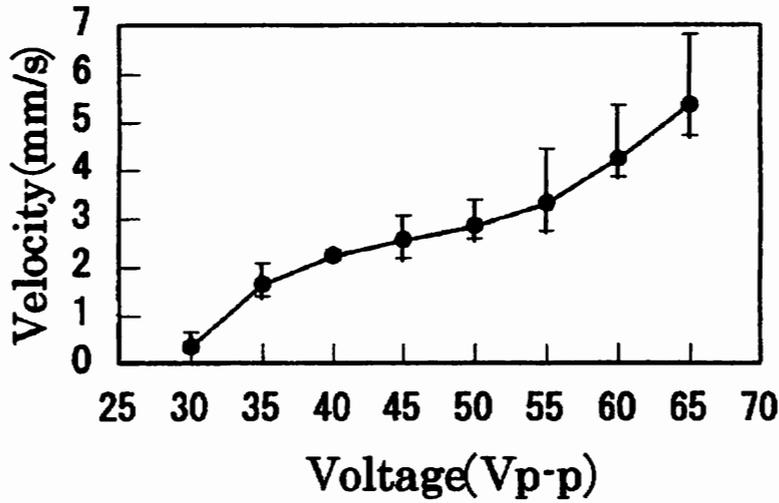


図 6.7: 印加電圧と前進速度の関係

を表す。

図6.7から、送波器の印加電圧を大きくしていくと、前進速度も大きくなることがわかった。これは印加電圧を大きくすると、送波器の超音波振動の振幅が大きくなり、そのため細管の振動の振幅も大きくなり、カプセルの振動が大きくなって、前進速度が大きくなったと考えられる。

6.4.2 後進移動

細管の加振による後進移動の実験は、送波器の放射面と細管の左側管端を接触させて、超音波振動を細管に伝達させて細管を振動させる。このとき、カプセルはアルミニウム円板側を送波器側にして、細管の左側管端から70mmの初期位置に停止させ、細管を振動させてカプセルが送波器に向かって、50mm後進した時間を測定し、移動距離を時間で割って、後進速度を算出した。間欠周波数は159.4kHzであり、印加電圧を25V_{p-p}から65V_{p-p}までの範囲を5V_{p-p}間隔で測定を行い、それを5回繰り返して後進速度の平均値を求めた。その結果を図6.8に示す。図6.8は、縦軸は後進速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。

図6.8から、送波器の印加電圧を大きくすると後進速度も大きく

なった。これは、6.4.1項の前進移動と同様で、後進移動は、カプセルの向きを前進移動と逆方向に変えただけであり、移動速度変化については、同じ理由で印加電圧を大きくすると、後進速度が大きくなったと考えられる。

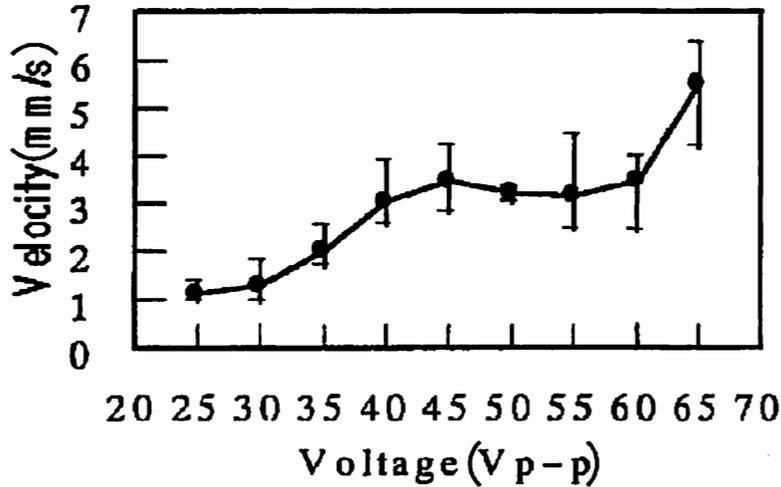


図 6.8: 印加電圧と後進速度の関係

6.4.3 印加電圧と最大前進距離

細管加振による印加電圧と最大前進距離の測定実験は、送波器と細管を同軸方向にして送波器の放射面と細管の左側管端を接触させる。カプセルは、りん青銅板側を送波器側にして、細管の左側管端から送波器で超音波振動を細管に伝達させる。細管の振動でカプセルが細管内を右方向に最大前進移動して、細管の左側管端から停止した距離までを測定した。間欠周波数は 159.4kHz であり、印加電圧 25Vp-p から 65Vp-p までの範囲を 5Vp-p 間隔で測定を行い、それを 3 回繰り返して平均値を求めた。このとき、カプセルの重量を 75mg(●) と 114mg(□) の二つの重さで測定した。実験結果を図 6.9 に示す。図 6.9 は、縦軸は最大前進距離 (cm)、横軸は印加電圧 (Vp-p) を表す。

図 6.9 から、カプセルの重量は違っても、印加電圧を大きくするとカプセルの最大前進距離も比例的に大きくなることがわかった。

また、印加電圧が同じ値のとき、カプセル重量の大きいほうが、重い重量の振動であるため、カプセルの振動が小さく、前進距離が小さくなったと推測される。

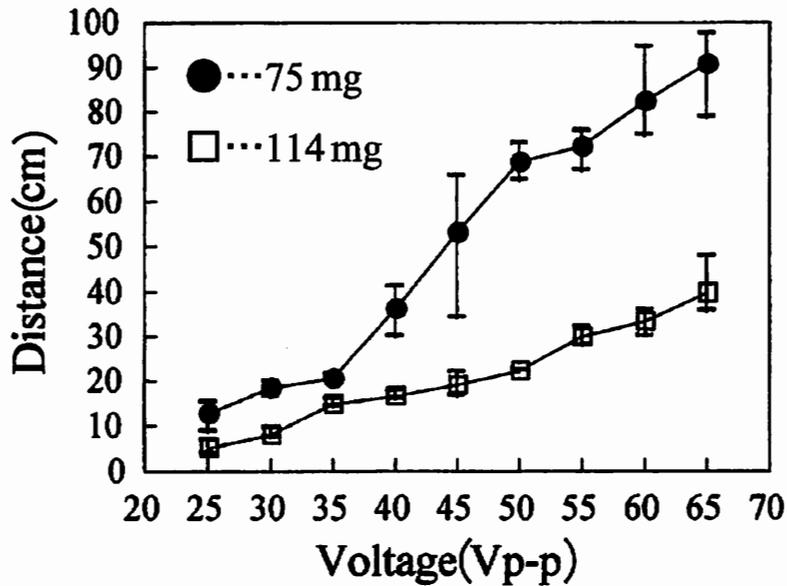


図 6.9: 印加電圧と最大前進距離の関係

細管加振時の印加電圧波形

FFT アナライザを使用して、細管に超音波振動を与えたときの送波器の印加電圧 60Vp-p の波形を観測した。図 6.10 は、間欠周波数が 159.4kHz のときの送波器の印加電圧の時系列波形であり、図 6.10 は、縦軸は印加電圧 (V)、横軸は時間 (ms) を表す。

図 6.10 の波形は、1 つ 1 つの波形が皆同じではなく、振幅や周期も一定ではなくバラバラな波形である。細管加振時の送波器の 60Vp-p 以外の印加電圧値においても、図 6.10 と同様なバラバラな波形が見られた。

6.4.4 細管の振動波形

細管の管軸に垂直方向に光ファイバ方式の非接触変位センサ (岩崎通信機社製, ST-3711) を当てて、送波器の印加電圧を 80Vp-p、間

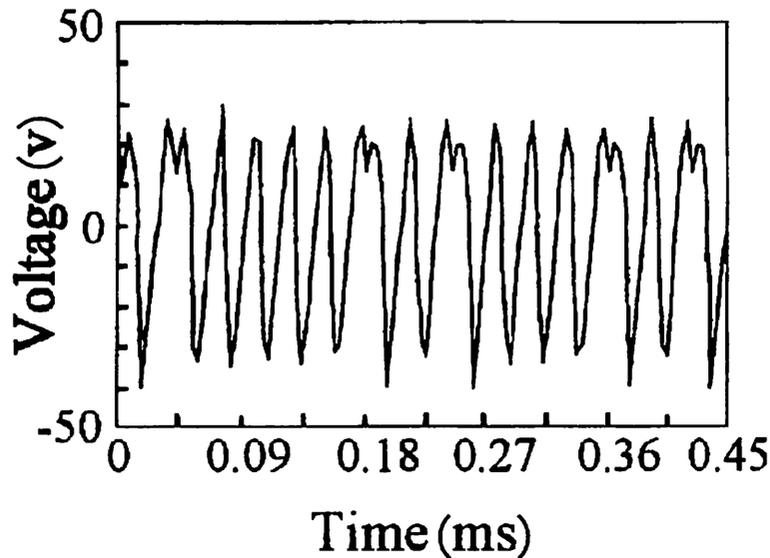


図 6.10: 時系列波形

欠周波数を 159.4kHz として、バースト波発振の細管の振動変位波形を観測した。その観測波形を図 6.11 に表す。図 6.11 は、縦軸は細管の振動の振幅変位 (μm)、横軸は時間 (ms) を表す。

図 6.11 から、加振中の細管の振動は周期や振幅が一定ではなく、バラバラな不規則振動していることがわかり、カプセルは、図 6.11 のような振動状態の中で前後進している。

6.4.5 考察

(1) 放射圧によるカプセル移動方法について、一般に超音波は媒質中を進むとき、超音波の進行方向に向かって波動エネルギーの流れができる。この波動エネルギーの流れを物体で遮ると、その物体を超音波の進行方向に向かって押す力が発生する。これは放射圧と言われ、媒質自身の流れによる力とは別のものである。放射圧 P_r [61] は、

$$P_r = E \left(1 + \frac{\rho}{c} \frac{dc}{d\rho} \right) \quad (6.1)$$

で表される。ここで、 E はエネルギー密度、 ρ は空気密度、 c は音速 (室温 25℃) を表す。式 (6.1) は右辺第 1 項の $P_1 = E$ が、波動エネルギー

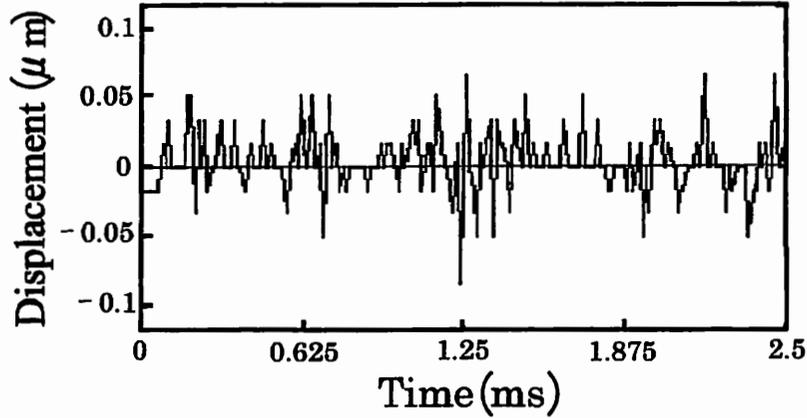


図 6.11: 振動波形の一例

ギの流れによる放射圧で、力の方向は波の進行方向で、よって方向性を持つ、第2項の $P_2 = E \frac{\rho}{c} \frac{dc}{d\rho}$ は流体の密度が変動するために生じる圧力で、力の方向性はない。管内を伝わる音波のように、媒質中を一方向にのみ進行する波を平面波という。平面波において、単位面積に加わる放射圧 P_r には、

$$P_r = E \quad (6.2)$$

の関係がある。カプセルが前進するのは、超音波の放射圧が関係しているのではないかと考える。ここで、細管内径7mmに対して、アルミニウム円板直径が6mmなので、簡単化するために、アルミニウム円板を閉管端と考える。閉管端において媒質の粒子速度は0になり、常に音圧変動が最大となる(定常波の腹となる)。すなわち、アルミニウム円板には、超音波のエネルギー密度 E [62] は、

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} \quad (6.3)$$

となる。ここで、 P は音圧の振幅、式(6.2)と式(6.3)から、カプセルに加わる放射圧は次式で示される。

$$P_r = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} \quad (6.4)$$

第6章 細管内移動体のカプセル輸送としての応用

単純に放射圧のみでカプセルを押しているとすれば、カプセルと接触している細管内壁面との静摩擦係数を μ 、アルミニウム円板の面積を S 、カプセルの質量を m 、重力加速度を g として、

$$\mu mg < P_r S = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} S \quad (6.5)$$

として式 (6.5) のとき、カプセルが放射圧に押されて前進するのではないかと考えられる。

そこで、式 (6.5) の有効性を検証するために、実際に数値を代入して移動に必要な音圧 P を概算として計算した。また、式 (6.5) に代入した数値を以下に示す。静摩擦係数 μ の値は、細管を傾斜させてカプセルが滑り始めた、その傾斜角度を測定して静摩擦係数を求める傾斜法で、5回測定を繰り返してその平均値を求めたもので、その値を示す。

$$m=0.031 \times 10^{-3} \text{kg}$$

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

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

$$c=346.38 \text{m/s}$$

$$S=28.27 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$\mu=0.45$$

以上の数値を代入して計算を行ったところ、移動に必要な音圧 P は、

$$|P| > 405.58 P_a \quad (6.6)$$

となった。これは、表1の出力音圧の数値から、カプセルが前進移動するのに必要な式 (6.6) の音圧値以上の出力音圧が送波器から放射されていることがわかり、カプセルの前進移動には、放射圧による力が影響していると思われる。

細管内に超音波を放射してカプセルが前進中に、送波器と細管の管端を接触させるとカプセルは前進しなくなった。また実際に、細管の管軸に垂直方向に非接触の光ファイバ方式の変位センサを当てて観測したが、振動の振幅は大変小さくほとんど振動していないことがわかった。これは、超音波がほとんど管軸方向に沿って細管内

を流れているためと思われる。このため、前進速度を大きくするには、出力音圧を大きくし、送波器を細管に接触しないようにして、送波器と管端の間から超音波が管外に漏れないように近づけて、超音波の波動のエネルギーを細管内に多く流れ込むようにすると、カプセルの前進速度は大きくなると考えられる。

(2) 送波器と細管の接触による、超音波振動を直接細管に伝達させてカプセルを移動させる方法について、実験から得られたことは、送波器と細管の接触を少しでも離すと移動しなかった。また、間欠周波数 159.4kHz の ± 0.2 kHz 付近でも移動したが、移動速度は小さくなった。送波器の印加電圧を大きくすると、移動速度も大きくなるが、移動中に、送波器と細管の接触部分から「ジ……」という振動音が聞こえ、印加電圧を大きくすると、さらに音も大きくなり、細管を触ると振動しているのが感じられた。これは、送波器と細管の接触で振動が細管に伝わり、細管の振動により、カプセルが加振力を得て移動したと考えられる。

以下に、細管加振による移動方法について考察すると、図 6.11 の細管の振動波形は、振幅や周期が一定でない不規則波形であり、細管は不規則振動していることがわかる。そこで、不規則振動している細管内でのカプセル移動は、確率共鳴 [65] と呼ばれる現象が起きているのではないかと考えられる。確率共鳴とはマイクロ世界において、ノイズ（熱ゆらぎ）の多数な角周波数帯の中から、その場にある微小機械系と相互作用を起こし、ある特定の周波数帯が選び出され、その周波数で微小機械が動くもので、ノイズと微小機械系との共鳴現象が、確率共鳴と呼ばれている。これは、ノイズ（熱ゆらぎ）の一部を有効な仕事に変化させることができるという。

以上のことをマクロ的に考えると、不規則振動場の細管内で、不規則振動とカプセルの運動とが相互作用を起こし、ある特定の周波数帯で細管の不規則振動とカプセルの運動に共鳴現象が起きて、その共鳴した振動でカプセルが移動するのではないかと考えられる。その特定の周波数帯が、間欠周波数 159.4kHz のバースト波信号で細管を加振することによって、細管は不規則振動し、その振動状態の中で、細管内壁面に対して傾斜角度を持ったりん青銅板の接触で、方向性が定められてカプセルが移動するのではないかと考えられるが、この問題は、今後さらに検討する必要があると思われる。

(3) カプセル重量に対する、超音波の細管内連続放射による移動と

第6章 細管内移動体のカプセル輸送としての応用

細管加振による移動との違いについて、カプセルの重量が小さい場合は、前進速度に大きな差が現れ、細管内放射による移動のほうが、細管加振による方法よりもはるかに前進速度が大きい結果となった。カプセルの重量を大きくしていくと、75mgの重さのカプセルでは、細管加振による移動が超音波放射による移動よりも7倍以上最大前進距離が大きかった。さらに、114mgの重量のカプセルでは、超音波放射による方法では移動できなかった。

このことは、細管内に超音波を放射させるよりは、細管を加振させたほうがより遠くまで振動が伝わり、振動エネルギーが遠くまで伝達していることを示している。しかし、細管を加振して移動する方法のほうが優れているというわけではなく、使用用途によって使い分けをすればよく、カプセルを遠くまで移動させるのであれば、細管を加振して移動させる方法が良く、短距離で軽い物の高速移動させるのであれば、細管内に超音波を放射して移動速度を大きくするほうが良いと思われる。

(4)本研究でのカプセル移動の特徴は、細管を加振してカプセルを前後移動させることができ、超音波の放射圧で、カプセルの移動を急速に速い速度に変化させ、また、カプセルの移動速度は、送波器の印加電圧を変化させればよく、これらのことを送波器が細管に接触または間隔を少し離すことで可能となり、大変手軽で簡単なカプセル作動方法であると思われる。これらの方法を使ってカプセル輸送をコントロールをして、細管内を安定してカプセル走行させることが可能となる。

細管加振による移動方法のまとめ

本節は、カプセルを水平細管内を前後進の2方向移動させる方法を開発した。その方法は、超音波の放射圧を推力とした方法、および細管を加振してその振動の伝達力を推力とした方法について研究を行った。

カプセルの構造も、片方には超音波放射を受波するためのアルミニウム円板があり、もう片方には細管の加振により振動するため傾斜角度を持つりん青銅板が付いているという特徴的な構造で、上述の二つの移動方法を可能にした構造となっている。このカプセル構造は他への応用が可能であり、細管の管端ではなく、細管の途中を

掴んで不規則な振動で加振すれば、カプセルの長距離の物資輸送が可能となる。また今回は、水平管での実験研究であるが、垂直管の下部に送波器を取り付けることにより、垂直管内のカプセル移動にも適用が可能である。そしてこの応用は、建物の上下階への小型の物資搬送用エレベータとして可能である [63]。

6.5 長距離細管内移動カプセルについて

6.5.1 長距離細管内移動カプセルの目的

長距離細管内移動カプセルの目的について、前節において管端に超音波放射力を放射してカプセル移動する方法と管端を加振してカプセルを移動する方法について述べたが、この方法はカプセルをある程度の距離しか移動できず、管端から超音波が届く範囲又は細管が振動する距離外では停止してしまう、細管内を長距離移動させるためには、移動の途中でエネルギーを供給する必要がある。水や空気ではなく、細管を加振してカプセルを輸送させる方式として、細管の途中を掴んで加振して、エネルギーを供給する方法について検討を行ったので、その結果を以下に述べる。

6.5.2 カプセルの構造

始めに、カプセルの構造を図 6.12 に示す。図 6.12 のカプセルは、カプセル本体の長さは 42mm、直径は 23mm とし、プラスチック製円筒ケースに、図 6.12 の左端に直径 30mm、R22mm の塩化ビニル製吸盤形状のものを接着し、右端には直径 28mm、R19mm の塩化ビニル製吸盤形状のものを接着した。このように、カプセル両端にこれらの形状のものを取り付けたのは、細管の振動からカプセルを保持するために弾力性のある傘状のものをカプセルに取り付けて、加振された細管からの振動を受けて、カプセルが細管内を移動する推力を得るとともに、弾力により移動中のカプセル本体の振動を軽減するように作られたためである。なお、このカプセルの自重は約 10gf である。

また、図 6.12 のカプセルは一方向 (紙面に向かって右方向) に移動するが、カプセルの向きを変えてパイプに挿入すれば、カプセルの往復移動が可能である。

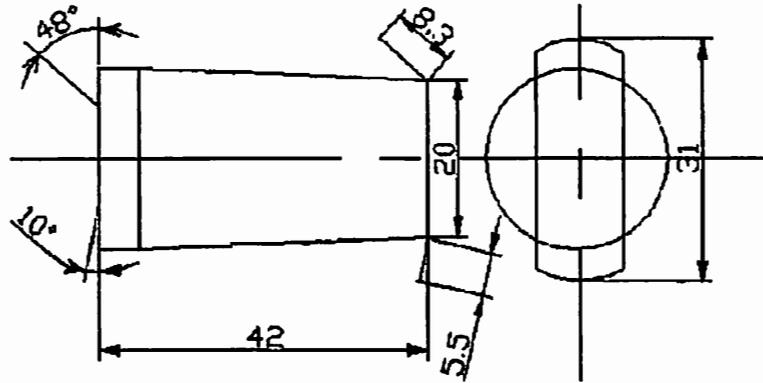


図 6.12: カプセルの構造

6.5.3 カプセルの長距離移動方法

図 6.13 にカプセル長距離移動の実験装置を示す。図 6.13 は、水平に置かれた長さ 4m の、内径 31mm の透明ポリカーボネイト細管の midpoint を掴んで、細管を加振させる装置で、その加振方法は発振器から正弦波パルスを発振させる。発振器から発振されたパルスは増幅器で電力増幅され、加振機に入力する。加振機から発生された加振力によって、接続された細管を加振してカプセルを移動する。

図 6.13 は、水平細管を加振して、カプセルを水平移動させる装置であるが、この装置は、このまま細管を垂直にして加振機を横方向にして、細管を掴み左右に加振させることにより、垂直方向の細管内部をカプセルが移動することができる。

6.5.4 カプセルの長距離移動実験

カプセルの走行速度変化

細管を加振するための周波数は 80Hz とし、加振機の実効値電圧 3.5V を与える。細管を 10cm 間隔で区切ってカプセルが移動中のそれぞれの間隔での速度を求めた。そして、それを 10 回計測して、その平均値を求めた。その結果のデータを図 6.14 に示す。図 6.14 は、縦軸がカプセルの速度 (m/s)、横軸を細管の左端からの距離 (m) を表す。

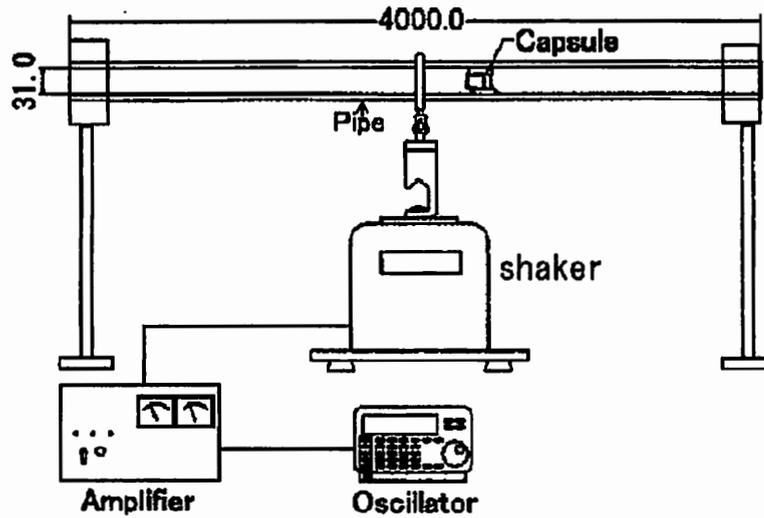


図 6.13: 細管の加振によるカプセル移動方法

図 6.14 をみると、カプセルの移動速度は、周期的な変化を表し、移動速度の大きさもほぼ一定の大きさとなっている。加振点での移動速度は小さい速度となった。

6.5.5 考察

振動を利用してカプセルを移動させる方法は今までにない方法で、実際にパイプを加振してカプセルの水平移動および垂直移動の実験を行って移動することが確認された。

パイプ加振によるカプセル輸送方式を水や空気を使ったカプセル輸送方式と比較すると、その利点は、水カプセル輸送のように水を大量に使う必要がなく、水に濡れては困る物も輸送することができる。また、空気カプセル輸送のようにパイプラインの傾斜角度が大きくなると、空気推力では上昇推力が不足し、カプセルが上昇できなくなることがあるが、振動式はカプセルの垂直上昇も可能である。

また、パイプ加振によるカプセル加振装置の設置面積は、水や空気を使ったカプセル稼働装置の設置面積に対して少なく済む。例えば、水や空気を輸送媒体とした場合、カプセルを押し流すための貯水槽や貯気槽を必要とするが、パイプ加振によるカプセル輸送装置は、それらを必要とせず、パイプに接続させた加振機と加振機を

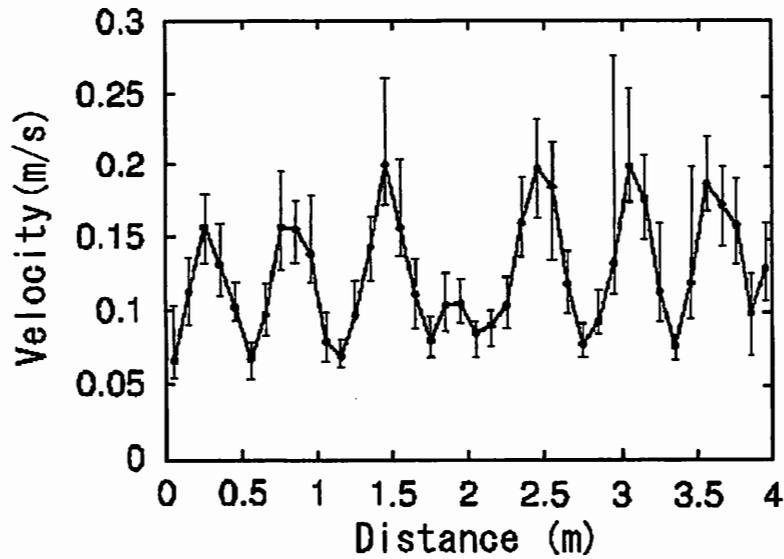


図 6.14: カプセルの移動実験

稼働しコントロールする装置の設置面積があればよい。

環境保全の観点からも、現在カプセル輸送で使われている、ブロワ、ポンプやコンプレッサーは騒音対策が必要となる。そのため、カプセル輸送はあまり都市部では設置されず、山間部などで設置されていることが多い。パイプ加振に使われるカプセルは、パイプに接触する部分に柔らかい材質の物を使っており、大きな騒音はしない。また、パイプの加振機構を変えることにより、ブロワ、ポンプやコンプレッサーの代替が可能となる。本研究において、内径が 30mm 程度の透明ポリカーボネイトパイプを使用して、パイプを加振して内部をカプセル移動させる実験を行ったが、実験結果は、水平、垂直ともパイプ内を概ね良好に移動した。

第7章 細管内移動体の荷役運搬機械としての応用

7.1 はじめに

「運搬」とは，“物を動かし運ぶ”ことを言い、人間が営み始めた時から根付いてきた行為であり、原始時代から現在まで、人間の知能の進歩と人口の増加の中で文明が生まれ、それに伴って重力・浮力という自然力や人力の運搬への利用、さらに進んで蒸気や電気を動力源とする機械力による運搬へと発展し現在に至っている。このような本来「運搬」という言葉には人間の意志に基づいて“物を持ち上げる、移動する”という行為のすべてが含まれる。

しかしながら、近代機械文明の発達の中で自動車・鉄道・船舶・航空機などの機械が広く使用されるに及んで、上記の交通機械による運搬は「輸送」という言葉でとらえ、「運搬」と切り離している。「運搬」の内容を目的によって大別すると、荷役、運搬、保管に分類され、荷役とは、物資を積卸し、積み付け、取り出し、荷ぞろえなどを行うこととなっている [64]。

現在、物流、荷役機械として、エレベータ、ベルトコンベア、クレーン、フォークリフト、無人搬送車などの各種物流機械が使われているが、ほとんどが大量輸送であり、小さい物の輸送や多品種少量輸送などの搬送機器は見当たらない。しかも、物を運ぶ運搬機械やロボットなどは、ほとんどが大量輸送用であるため、使用される場所も工場や大きな建物の中などであり、私たちが住んでいる、一般家屋、アパートやマンション、数階建ての小さなビル内などでも、人間が持ち運びする荷物を人間に代わって、水平移動や垂直移動して各部屋まで持ち運ぶ機械があれば、力が弱い老人や身障者、または主婦にとって大変役に立つと思われる。しかし、このような機械はまだ存在していないし、また、エレベータの設置においても、エレベータは場所を取り、機械室などを必要とし設備費もかかる。そのため、簡便な方法での建物内を小物搬送してくれる機械として、

細管内移動体の利用の可能性について、検討を行った。

7.2 荷役運搬移動体としての応用

7.2.1 超音波放射力を利用した荷役運搬移動体

建物内を細管内を通して、物を運搬や搬送することができれば省力化となり、物流に対して大変役に立つことと考える。この場合物資を手軽に搬送する必要があり、しかも、人間が住む建物を細管移動させるためには、水や空気による作動媒体では、水漏れの心配やコンプレッサなどの騒音環境問題が生じてくる。このため作動媒体は手軽に設置ができて、環境問題を生じさせないような、超音波による物の搬送が最適ではないかと考え、検討を行った。さらに、建物の壁の中を搬送移動させれば、人の目に触れられず安全性が保たれる。

7.2.2 移動体の構造

荷役運搬する移動体の構造を図7.1に示す。図7.1の構造は超音波を受信しやすい形状をしている。この構造は、作動媒体が超音波を使用するため、一つの円筒軸と両側の金属円板から成り立っている。実際に製作した荷役移動体は、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、外径3.5mm、長さ5mmであり、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15 μ mである。金属円板は円筒軸の両端に接着剤で接着してある。その円筒面上が細管内壁面と接触する。図7.2のように、荷役移動体が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である。

荷役移動体は、内径7mmの細管内を移動し、移動体の自重は11.9mgfである。

7.2.3 水平移動実験

a. 実験装置

図7.3に水平移動の実験装置を示す。長さ1mの細管を水平に2台

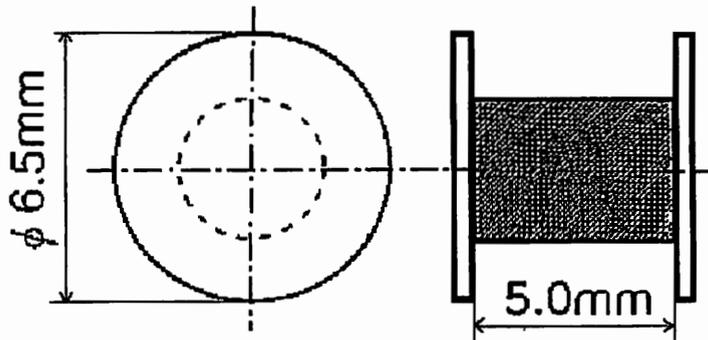


図 7.1: 荷役移動体の構造

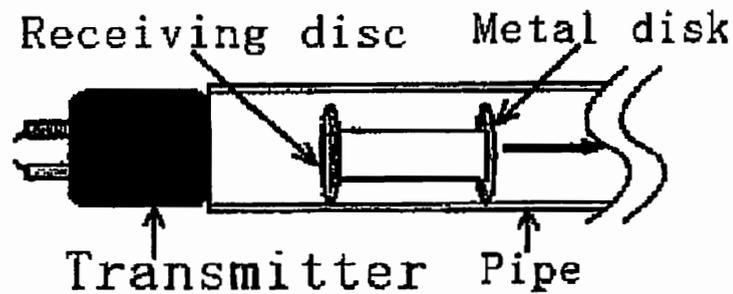


図 7.2: 細管の中の荷役移動体

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、アンプで印加電圧を 10 倍に増幅して、FFT アナライザで印加電圧を測定しながら、超音波送波器に電圧を印加し、送波器から細管内に超音波を放射する。なお、本章で使用した細管はすべて内径 7mm の透明アクリル材質の細管を使用した。超音波送波器には、すべて空中超音波センサ (村田製作所, MA40S3S) を使用し、送波器の印加電圧はデューティ比が 50 % の方形波パルスの電圧を与えた。

b. 印加電圧と移動速度の関係

実験方法は、管端から 1mm の位置に荷役移動体を置いて、送波器から超音波を放射して移動体を移動させる。放射して 1 秒後の移動距離を測定して、移動距離から移動速度を求めた。これを 12 回繰

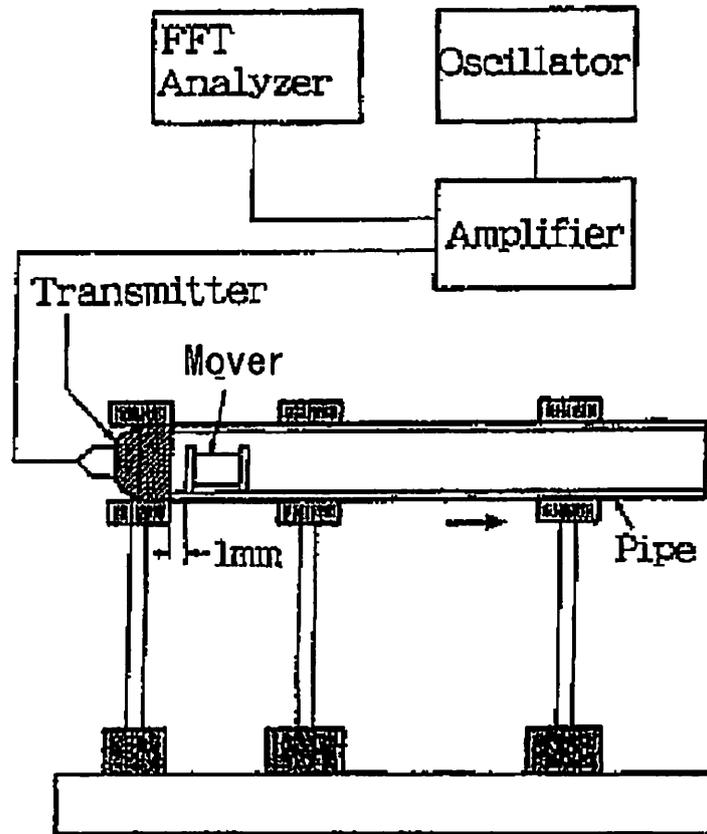


図 7.3: 水平移動実験装置

り返して速度の平均値を算出した。送波器の印加電圧を $5V_{p-p}$ から $80V_{p-p}$ まで $5V_{p-p}$ 刻みで変化させて、各電圧における速度の平均値のデータを出力した。その結果を図 7.4 に示す。図 7.4 の縦軸は速度 (cm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) である。図 7.4 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 V とすると、

$$v = 0.004V^2 + 0.022V \quad (7.1)$$

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。

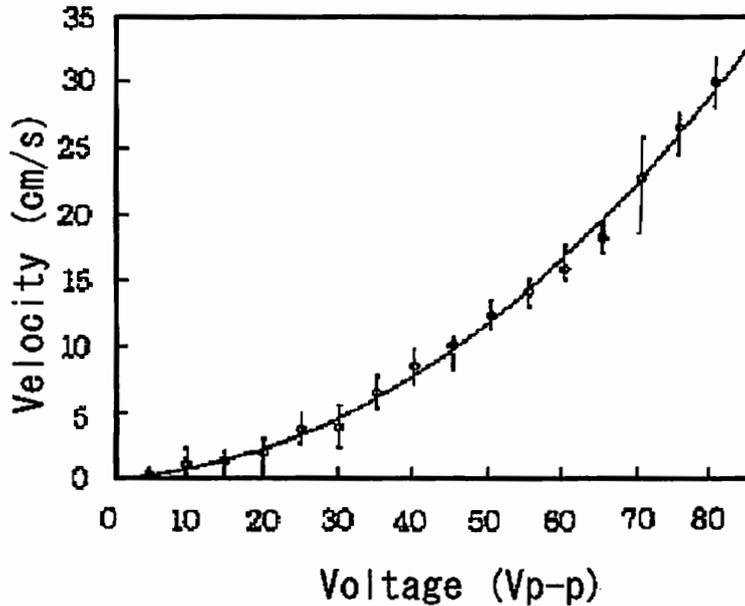


図 7.4: 印加電圧と移動速度の関係

c. 移動距離と速度の減衰について

実験中に、細管内を荷役移動体が移動する距離が大きくなると、移動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。実験装置は前項と同じ装置を使用し、管端から 1mm の位置に移動体を置いて、超音波送波器の印加電圧を 80V_{p-p} にし、40kHz 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 回繰り返して、平均速度を算出した。その結果を図 7.5 に示す。図 7.5 の縦軸は移動速度 (cm/s)、横軸は時間 t (s) を表す。図 7.5 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 7.5 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、

$$v = 29.117 \times t^{-1.256} \quad (7.2)$$

となる。このように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。

d. 水平移動の原理

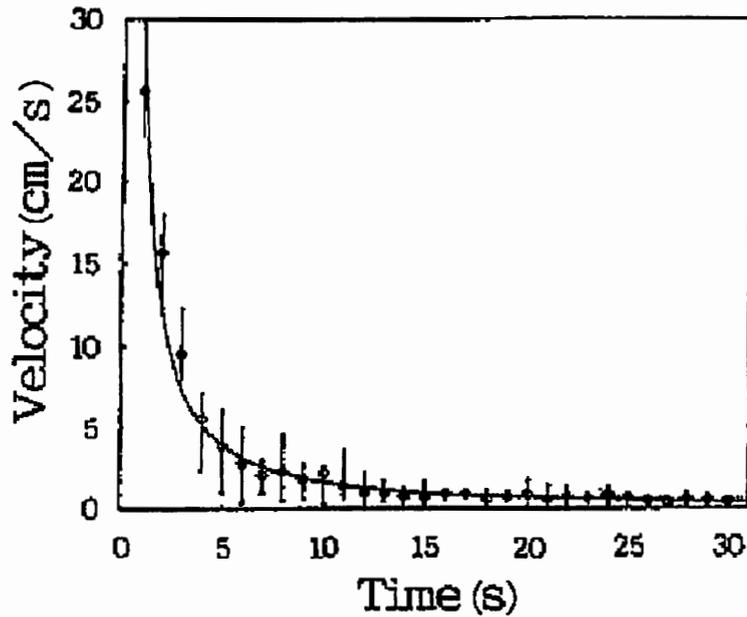


図 7.5: 移動距離と速度の減衰について

超音波を細管内に放射すると、超音波エネルギーの流れができ、荷役移動体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する。その推力が図 7.6 の F 方向に押し出す。これに対して、荷役移動体の移動を妨げるようにして、図 7.6 で示す摩擦力が働く、そこで、移動体が 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、

$$\frac{1}{2}\mu mg + \frac{1}{2}\mu mg < F \quad (7.3)$$

式 (7.3) の条件のとき、移動体は移動すると考えられる。式 (7.3) を確かめるために、実際にパラメータを代入して移動に必要な音圧を計算した。細管内の超音波は、図 7.6 の F 方向にのみ音波が伝わる平面波とし、細管内径が 7mm に対して移動体の受信円板は 6.5mm だから、ここで、移動体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 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、

$$F = SE \quad (7.4)$$

で表せる。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、

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_o c} \quad (7.5)$$

となる。ここで、 ρ_o は媒質密度、 P は音圧、 c は音速を表す。これからの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、

$$E = \frac{I}{c} \quad (7.6)$$

となる。式 (7.5) を式 (7.6) に代入して、

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_o c^2} \quad (7.7)$$

となる。ここで、式 (7.4) を式 (7.7) に代入すると、

$$F = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_o c^2} S \quad (7.8)$$

となり、式 (7.3) の F を式 (7.8) に代入すると、

$$\frac{1}{2} \mu mg + \frac{1}{2} \mu mg < \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_o c^2} S \quad (7.9)$$

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。

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

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

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

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

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

$$\mu = 0.67$$

式 (7.9) に、これらの各パラメータを与えて移動に必要な音圧を計算すると、

$$P > 817.0 \text{ Pa} \quad (7.10)$$

となった。次に、式 (7.10) 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、 $V = 5.5V$ となった。そのため移動に必要な印加電圧 V は、

$$V > 5.5 V \quad (7.11)$$

となる。式 (7.11) での印加電圧以下の移動体の確認を 1V, 2V, 3V, 4V 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 7.4 の実験結果から、5V 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、移動体が水平移動するときには、式 (6.3) の条件を満たすときと思われる。

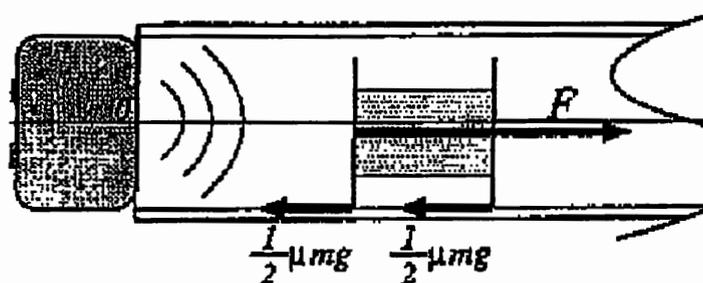


図 7.6: 摩擦力と推力の関係

7.2.4 垂直移動実験

a. 実験装置

図 7.7 に、垂直移動の実験装置の概略を示す。長さ 30cm 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。

b. 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、荷役移動体を送波器の上に置き、40kHz の超音波を放射して、移動体の

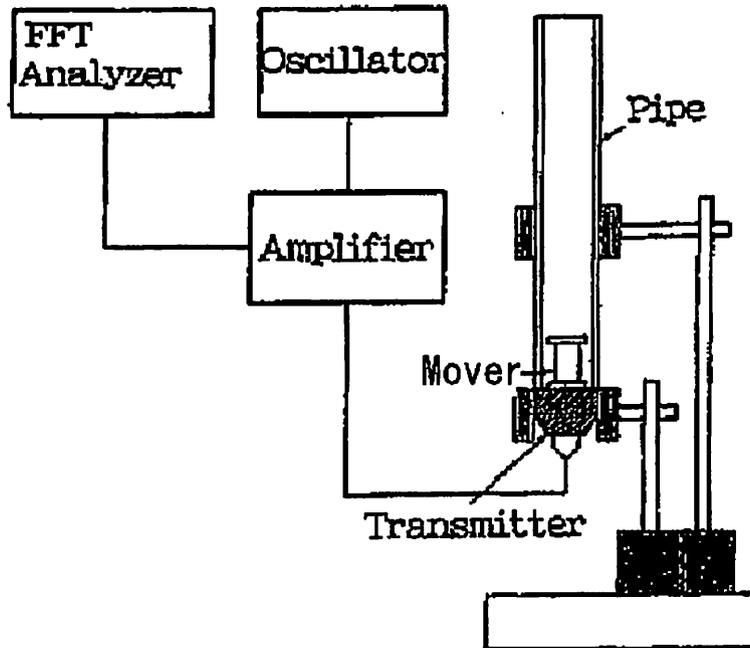


図 7.7: 垂直細管内荷役上下搬送装置

最大上昇距離を測定した。それを 10 回繰り返して平均の上昇距離を計算した。そして、印加電圧を 5V_{p-p} から 80V_{p-p} まで 5V_{p-p} 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 7.8 に示す。図 7.8 の縦軸は上昇距離 (cm)，横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を表す。図 7.8 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、

$$h = 0.351V - 1.591 \quad (V > 10) \quad (7.12)$$

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、送波器の印加電圧が 10V 以下での移動体の上昇はしなかった。

c. 上昇移動の原理

細管内を伝搬する超音波は、図 7.9 の y 方向にのみに伝搬する平面波として考察を行う。移動体の受信円板を閉管端と考え、移動体を

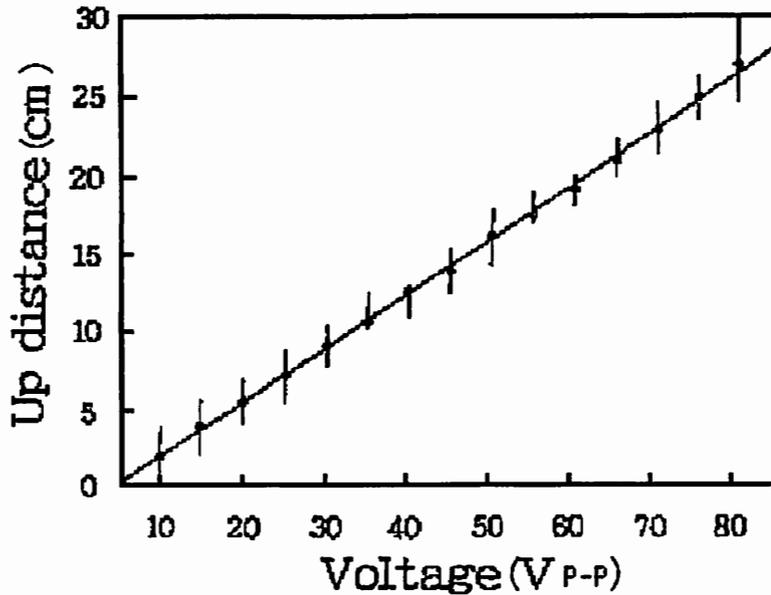


図 7.8: 印加電圧と上昇距離の関係

上昇させる力は、受信円板上にかかる音響放射力で、上昇を妨げる力は移動体の自重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 、移動体の自重を m とすると、

$$F > mg \quad (7.13)$$

式 (7.13) 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、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 (7.8) と式 (7.13) から、

$$mg < \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c^2} S \quad (7.14)$$

で表され、式 (7.14) に前項と同じパラメータの数値を与えて、音圧 P を計算すると、

$$P > 998.0 P_a \quad (7.15)$$

となる。式(7.15)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 を求めた。その結果電圧 V は、

$$V > 6.2 \text{ V} \quad (7.16)$$

となった。図7.8の実験結果から、印加電圧が10V以下での移動体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、両端の金属円板が細管内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、移動体の上昇できなかったのか、または、受信円板の面積が細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、以上の考察結果を考慮して、式(7.16)の条件に合えば、音響放射力による移動体の上昇は可能であると思われる。

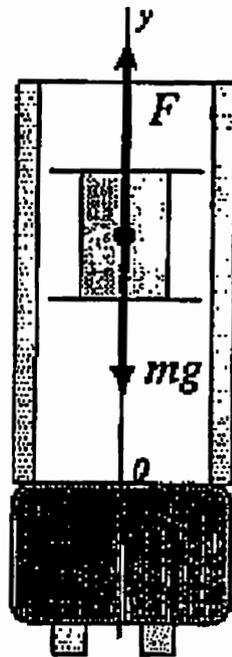


図 7.9: 垂直上下移動実験装置

7.2.5 垂直上昇搬送実験

次に、荷役移動体が上昇方向にどの位の重量物を持ち上げることができるのかについて、実験を行って調べてみた。実験装置は図7.7と同じ装置を使用し、荷役移動体を管端に接触した超音波送波器の上に置き、さらに移動体の上昇搬送させるものを取り付け、送波器の印加電圧を80V_{p-p}にして、40kHzの超音波を細管内に放射して、荷役移動体の上昇距離を測定した。搬送物体の総重量を1.5mgf, 3mgf, 7mgf, 8.5mgf, 11.5mgf, 14mgf, 16mgf, 17.5mgfとし、それぞれ10回ずつ最大上昇距離を測定し、その平均値を求めた。その結果を図7.10に示す。図7.10の縦軸は上昇距離(mm)、横軸は上昇搬送した物体の重さ(mgf)を表す。図7.10の実線は各測定点の平均値を線で結んだものである。図7.10から、重量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。図7.10の実験データから、1.5mgfの重量物を約239mmまで持ち上げたのに対して、移動体の自重とほぼ同じ重さの11.5mgfは、約24mmまでしか上昇搬送できず、17.5mgf以上の重さでは上昇しなかった[69]。

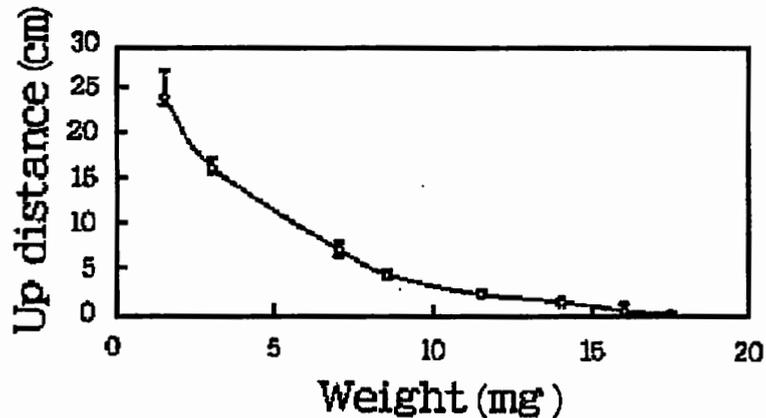


図 7.10: 上昇搬送測定

7.2.6 考察

(1) 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ることから、印加電圧の値を適切に決めることに

第7章 細管内移動体の荷役運搬機械としての応用

よって、荷役移動体を垂直細管内の指定する高さに停止させることができ、上下搬送高さの位置調整が設定できる荷役運搬移動体が可能である。

(2) 本研究の荷役移動方法は、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、移動体が超音波の放射力によって後ろから押されて細管内を前進する構造によるものである。移動体そのまま前後進の2方向移動できれば、往路と復路の2本の細管が1本で済むなど利点があり、活用範囲がさらに広がるものと思われるが、このためには移動体の構造を再検討する必要がある。後方から超音波放射力を受けたとき、その力を逆進の推力に変換できる機構を考える必要がある。

(3) この実験では、超音波送波器として超音波センサ送波用を使用した。超音波放射力がさらに大きい送波器を使用すれば、水平細管内の移動距離や、垂直細管内の上昇搬送力を大きくすることができると思われる。しかし、長距離輸送を考えた場合、実際には超音波の届く距離は限られるので、移動の途中で超音波エネルギーを補給する手段が必要になってくると思われる。

(4) 実用化について考えると、パイプラインの敷設場所によっては、水平状態から垂直状態に移動する場合やT字管内での分岐移動、移動体同士の衝突防止対策などの種々の課題に対する検討も必要になってくると考えられる。

第8章 壁面間移動体としての応用

8.1 はじめに

私たちの生活環境の中で、壁面間を移動するロボットがあれば、人間が入って行けないような建物と建物との狭い隙間を自由に移動することができ、壁面間を倉庫代わりに利用したり、または道路の側溝などに詰まったごみや落ち葉などを、両壁面を伝わって移動しながら清掃することができるなど、私たちの生活に大変役に立つ。現在、実用化されている壁面を移動するロボットは、鋼板でできた壁面を磁石などの電磁力を使っての片壁面への吸着移動、および真空ポンプを使った負圧による片壁面への吸着移動するロボットが開発されている [68]。

ところがロボットの内部構造は、アクチュエータのコントロール回路などを含み複雑な構造となり、そのため、ロボット自体の自重も重くしていることが多い。また以前に、壁面間を移動する移動体の研究は、佐藤ら [70] が行っており、その移動方法は、移動体の両側に斜めに細長い弾性毛を植え付けて、壁面間の幅を変えて壁面で弾性毛の先端を加圧し、その弾性毛のたわみ力を利用して移動するもので、移動体が一方向移動する研究結果の報告がされている。

8.2 壁面間移動体について

8.2.1 弾性板型壁面間移動体の移動方法

本研究で行っている細管内移動体は、主に細管内を移動するための研究であるが、細管の内部は平行な壁面であり、移動体は平行な壁面間を移動する。このことから利用できるものとして、考えられる応用技術としては、細管内を移動するばかりではなく、平行な壁の間であれば、どの場所でも移動可能である。例えば、建物と建物との間の壁を移動することも、細管の壁面間を移動するのと同じ移動

状況である。このため、細管内移動体の移動技術を壁面間移動技術にも応用できると考え、実際にどのような応用ができるのか、以下にその応用技術を述べる。

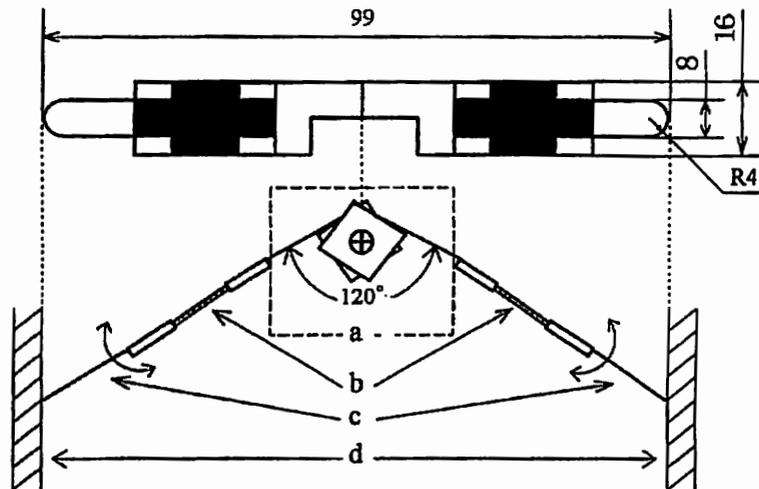
本研究の壁面間移動体の移動方法は、壁面間は固定された状態で移動体自体が振動して移動する。そして、複雑化する内部構造をなるべく無くし、もっと簡単な構造で壁面間を移動するロボットの開発を目指す。その結果考案された移動機構は、移動体に傾斜角度を持つ、細長い弾性板を取り付け、弾性板の先端が壁面に対して斜めに接触させて、弾性板を圧電アクチュエータのバイモルフ振動でたわみ振動を起こさせ、その振動を推力として、弾性板の先端が壁面を滑走して壁面間を移動する、

実際に壁面間を移動する移動体を製作して移動実験を行い、弾性板を加振する圧電アクチュエータの印加電圧の大きさを変えて、移動体を前後進の2方向移動させる実験を行ったので、以下にその実験結果の考察を述べる。

8.2.2 壁面間移動体の構造

製作した移動体の構造を図8.1に示す。図8.1bの両側の圧電アクチュエータは、長さ40mm、幅16mm、厚さ0.53mmの大きさのものを使用し、バイモルフ振動をする。aの保持部で二つの圧電アクチュエータを圧着して固定する。cは弾性板としてりん青銅板を使用し、りん青銅板の大きさは厚さ0.05mm、幅8mm、長さ約15mmで、圧電アクチュエータの端にりん青銅板の端を圧着固定した。また、壁面側に接触するりん青銅板の先端は、R4mmで丸く削ってある。りん青銅板を使用したのは、加工性が良くばね特性が優れている。移動体は、幅が5mmの溝のガイドレール上を前後進する。りん青銅板の先端が接触する壁面dは透明の亚克力材質を使用し、りん青銅板は始めに初期接触角度を 60° として壁面に接触させる。両側の圧電アクチュエータに同時に矩形波パルスの印加電圧を与えると、圧電アクチュエータがバイモルフ振動し、移動体は、aを中心に、傘が開いたり閉じたりする開脚運動をする。印加電圧を与えないときは、りん青銅板の先端が壁面に接触して静止しているが、印加電圧を与えると、りん青銅板の先端が壁面に保持されてたわみ振動をする。次に、 60° に傾けたりん青銅板の接触先端と亚克力

壁面との静摩擦係数を測定すると、図8.2の前進方向には0.4、後進方向には0.19となった。前進の摩擦係数は、後進の摩擦係数の約2倍あり、このことは、前進方向よりも後進方向の方が滑りやすいことを示している。



- a : Attaching part
- b : Piezoelectric actuator
- c : Phosphor bronze plate
- d : Wall surface

図 8.1: 壁面間移動体の構造

8.2.3 実験方法

実験方法は、図8.1の移動体を、図8.2のガイドレール上を移動する台車に取り付け、台車はガイドレール上を滑らかに移動する。両側の圧電アクチュエータに同時に印加周波数500Hzを与えて振動を起こさせ、圧電アクチュエータの印加電圧を $25V_{p-p}$ から $70V_{p-p}$ まで $5V_{p-p}$ 刻みで与えて、前後進時の移動速度を測定し、それを5

回繰り返して、その平均値を求めた。なお、台車を含めた移動体の自重は約 15.4g である。

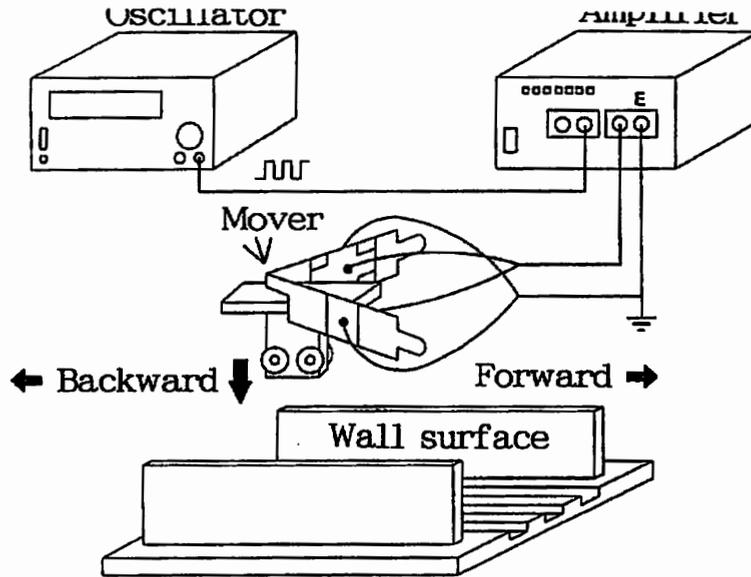


図 8.2: 壁面間速度測定の実験装置

8.2.4 実験結果

移動体の速度測定実験の結果を図 8.3 に示す。図 8.3 は、縦軸は速度 (mm/s)、横軸は印加電圧 (V_{p-p}) を示す。また、グラフ内の各測定点での実線の縦幅は、測定値のばらつきの程度を表す。図 8.3 の実験結果から、移動体は圧電アクチュエータの印加電圧が小さいときは後進し、印加電圧を大きくしていくと、前進に切り替わり、さらに印加電圧を大きくしていくと、前進速度も大きくなっていく傾向となった。このことは、圧電アクチュエータの印加電圧の大きさを変えることによって、りん青銅板のたわみ振動の振幅が変化して、壁面に対するりん青銅板の接触先端の力が変化し、その反力をもって移動体が前進および後進すると考えられる。

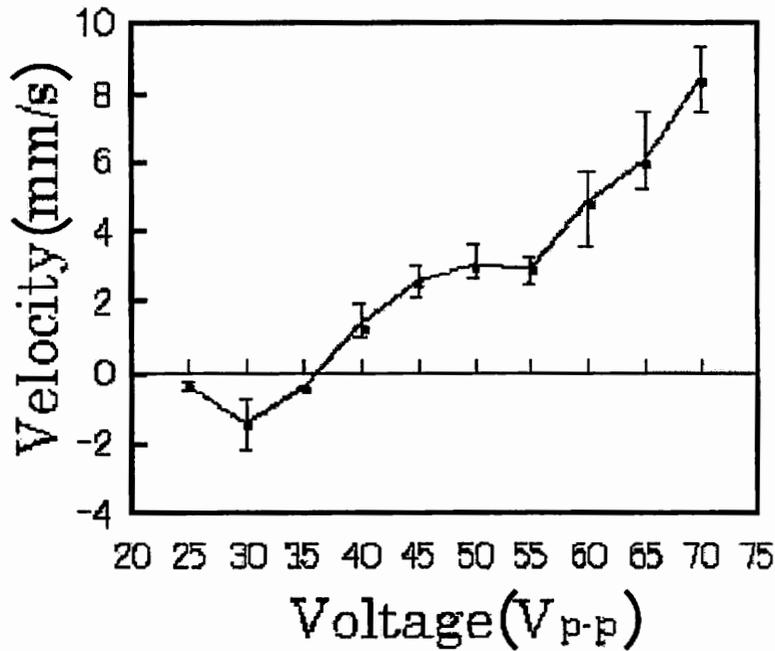


図 8.3: 印加電圧と移動速度の関係

8.2.5 考察

両側の弾性板の接触角度をそれぞれ違う角度にした場合、移動状態はお互いに接触角度が違うことにより、両側同時に先端が滑走するのではなく、常にどちらかの先端が壁面に接触している状態での移動となり、移動体は安定した移動挙動を示すのではないかと考えられるが、この場合、移動体が受ける力は x 軸方向だけではなく、 y 軸方向や回転方向の力も考慮しなければならず、解析は複雑になると予想される。

本研究の壁面移動体の長所は、構造が大変簡単であり、移動体自体の小型化や軽量化も可能であり、また、弾性板の数を多くすれば、弾性板先端の保持力も大きくなって自重を保ちながら、移動体の垂直壁面の上下移動も可能になるのではないかと考えられ、さらに、保持力を大きくすれば、物を運搬する力も発生してくるのではないかと考えられる。

本研究の結果から、壁面に弾性板を斜めに接触させ、弾性板にたわみ振動を与えて、直接壁面に振動を伝達させて、その伝達力を移

第8章 壁面間移動体としての応用

動の推力とした、移動方法が可能であることが確認できた。また、圧電アクチュエータの印加電圧の大きさを変えるだけで、前後進の移動方向が切り替わる方法を示すことができた。

第9章 結言

9.1 各章のまとめ

まず始めに、本論文の各章において研究結果のまとめたものを列挙する。

第2章では、細管内移動体の研究を行うに当たって、特に移動する技術に関して記述し、本研究を行うに当たって必要となる種々のアクチュエータの検討事項をまとめた。

その結果、細管内を移動する移動体を製作する上で必要となる条件を抽出した。要約すると、移動体はできるだけ軽量かつ構造が単純であれば、部品点数が少なく済み、コンパクトな構造が可能となる。さらに、2方向移動ができれば、万一細管内に詰まったときに戻ってこられるし、移動方向の切替装置が簡単かまたは無ければ、移動体にその分のスペースが必要なくなり、自重も軽くできる。

第3章では、形状記憶合金、電磁力、圧電の三つのアクチュエータを使用した、細管内移動体の移動実験を行い、比較した結果圧電アクチュエータを使用した細管内移動体が最適との結果を得た。その理由として、他のアクチュエータよりは圧電アクチュエータのほうが応答速度が早く、変位精度が高いため細かい位置決めが可能であり、印加電圧だけで変位の大きさを変えられるので、消費電力は小さい。しかし、圧電アクチュエータは振幅変位を大きく取れず、機構的な補強構造が必要になると考えられ、細管内移動体として、この問題の対策が移動体の構造に大きく影響してくることがわかった。さらに、ワイヤによるエネルギー供給移動体は、移動体が小さくなればなるほど、ワイヤエネルギー供給の種々の問題が発生し、細管内移動体の移動の妨げがある。

これらの問題は、

- 1) ワイヤが長くなると、ワイヤと細管内壁との接触摩擦力が大きくなり、そのため移動が困難になる。

- 2) 長距離型の細管内移動体では、さらにワイヤが長くなるため、逆に移動体を引き戻そうとする力が働き、移動はさらに困難になる。
- 3) 曲管部の細管内移動では、ワイヤが曲部に引っ掛かって移動が妨げられるケースが存在する。

以上のように、ワイヤ付きエネルギー供給移動体では長距離移動を困難にしていることが明らかとなった。

第4章では、ワイヤレス型エネルギー供給移動体について述べた。種々のワイヤレス型移動体を試作し、移動実験を行った。その構造の特徴は超音波振動や超音波放射波動を直接受信して、そのまま移動推力に変換する機構であり、移動体の構造としては大変単純で簡単な構造である。

これからのマイクロ移動ロボットは、ワイヤレスでエネルギー供給を行う場合、エネルギーの自給性が必要になると言われている。ロボットに限らず移動体においても、移動するためには、エネルギーを自給するか、またはエネルギーが外部から与えられたら、自分でエネルギーを取り込んで移動するようなシステムが必要になる。このためには、場のエネルギーを使う方法が大変有効であり、外部から場のエネルギーとして与えられる超音波、光、電磁場などを利用して移動するような機構を作ることは、ワイヤレスエネルギー供給方法として、今後さらに必要になると思われる [52]。

第5章では、細管内移動体について理論的な解析手法を行った。移動の推力となるりん青銅板の先端と接触壁面との関係に着目し、その部分についてのモデルを考え、理論的な解明を試みた。そして、運動方程式を求めて数値計算を行い、印加周波数や印加電圧のパラメータ数値を変化させることにより、移動体の移動方向や移動速度が切り替わる現象がみられ、実験において観測された現象とよく一致していることを示した。

第6章では、カプセルの構造に対してもまだまだ改善を必要とするが、細管を加振してカプセルを移動させる輸送技術について論じた。実際に物をカプセルに積み込んで水平方向や垂直方向を運ぶことは可能であることを示した。

第7章では、細管内の少量輸送や細管を数本まとめたの一括輸送を前提として、超音波の波動伝搬による荷役運搬への利用の可能性

について、実際に荷役運搬移動体を試作して、移動実験を行って実験結果から考察を行った。

移動実験では超音波の放射力を利用して、内径7mmの細管の水平移動及び垂直移動が確認できた。また、水平および垂直の両移動とも、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数式から求められることを示し、移動体が細管内移動を可能とする条件を超音波送波器の印加電圧から求められることが可能となった。

第8章では、弾性板の振動を利用した壁面間移動体について述べたが、壁面間移動体の基本構造である、壁面に弾性板を斜めに接触させてたわみ振動を与え、直接壁面に振動を伝達させて移動推力を得る移動方法は、実験からも可能であることが確認できた。

壁面間移動体は使用する圧電アクチュエータの印加電圧の値を変えるだけで前後進が切り替わることが可能である。

壁面間移動体は、構造が大変簡単であり、移動体自体の小型化や軽量化の可能性もあり、弾性板の数を多くすれば、弾性板先端の接触保持力も大きくなって自重を保ちながら、移動体の壁面の垂直に上下移動も可能になると思われる。また、圧電アクチュエータの大きさを大きくすることによって、弾性板の保持力も大きくなり、物を運搬搬送する力も大きくなると推測される。

9.2 全体を通しての結論

前節から全体を通して結論を述べる。本研究は、今までにない全く新しい細管内移動体の研究である。細管自体は日常生活のあらゆる環境の中で使われており、それぞれの用途目的にしたがって使用されている。そして、液体や気体や固体のほとんどの物質を細管内を流すことに使われているが、細管を通して物を運搬するという方法に対しても十分に利用が可能であり、細管内のカプセル輸送や荷役運搬輸送としても応用が可能である。

ところが今までその利用があまり考えられていなかったのは、細管内を物を運ぶときに必要となるエネルギーの確保の問題が解決できなかったからではないかと考えられる。近距離輸送ならば、アクチュエータにワイヤを接続してエネルギーを供給して移動させることは可能であるが、長距離輸送になるとアクチュエータにワイヤを接

続してエネルギーを供給する場合に、ワイヤが細管内の途中で引っ掛かったり、ワイヤの管内壁面との接触による摩擦抵抗やワイヤの重さが負担になったりして細管内移動が困難になる。そのためには、細管内移動体にワイヤレスによるエネルギー供給方法が必要となる。

本研究を通して、細管内を移動させるために種々のアクチュエータを使用して細管内移動体を製作してきたが、移動体の移動の特徴は、移動体自体が振動し、細管内壁面に斜めに弾性板を接触させて、移動体の振動を壁面に伝達させ、その伝達力から移動推力を得て移動する。

このことから、移動体を振動させるアクチュエータはどのアクチュエータを使っても移動が可能であるが、細管内を移動するという条件のもとに、アクチュエータは小型化が可能で、軽量で簡単な構造のアクチュエータに最適と考えられる。

9.3 今後の課題

細管内移動体は、あらゆる人間の生活環境の中で利用が可能であると思われる。例えば、家と家が離れている山間地であるとか、雪の多く降る豪雪地帯などで各戸にパイプを通すことにより、少量物資の輸送が可能であり、パイプの加振によるカプセル輸送なら、物資が水に濡れることもなく、傾斜角度による上昇移動推力の低下を問題にすることもなく、物資を運ぶことが可能であると思う。また、ごみの収集作業用にカプセル輸送を利用すれば、カラスの被害やごみの集積場所をめぐるトラブル、ゴミ収集車による朝のラッシュ時での交通渋滞を引き起こす問題の解決の助けになると思われる。

また、アクチュエータ自体は小型化は必要であるが、アクチュエータに与えるエネルギーは、自然エネルギーを利用しても細管内移動は可能であり、例えば、風の力を利用して繰り返しの振動を発生させ、その往復振動で細管を加振すれば、細管内を移動体が移動することは可能であり、または、海岸に押し寄せる波の力を利用して往復振動を発生させ、その加振によっても細管内を移動することは可能である。このように自然の力を利用して加振エネルギーを取り出すことができれば、環境に配慮した細管内移動体は無公害に近い状態で、しかもあまり維持費のかからないエネルギーとして使うことが可能であると思われる。

細管内移動体の研究は、物流の問題と大きく関係していると思われる。現在物流事情は大きく変化を遂げており、従来のような大量生産、大量消費、大量廃棄ではなく、原材料の調達 → 生産 → 流通 → 使用消費 → (使用・消費後の製品・容器などの) 回収 → 再資源化 (→ 調達) といった物質の循環過程をより効果的・効率的にまわすためのシステムとマネジメント体系が必要とされ、資源の使用効率の高い「循環型社会システム」へとシフトしている。

ところが貨物自動車輸送は、トラック (とくにディーゼルトラック) の排出ガスが主原因となってNO_x(窒素酸化物) やPM (粒子状物質) による大気汚染が改善されず、自動車は地球温暖化を加速させる温室効果ガスのCO₂(二酸化炭素) の排出源でもあり、地球温暖化防止の観点からも、排出ガスを低減化することが強く求められている。とくに近年、ディーゼル車から排出されるPMについては、発がん性の恐れを含む健康被害が懸念され、国や東京都などでは、自動車交通から生じるNO_xやPMの削減を図る新たな対策を

早急に講じようとしている [79].

トラック輸送は今後もさらに必要とされる輸送手段であるが、反面、原油の枯渇に対するガソリンの高騰や環境問題に対する影響などが大きくなってくると予想される。

このことに対して、パイプラインの機能的な特質は、安定供給性、災害供給性、輸送適用性、環境適用性に代表され、パイプラインは休むことなく連続的に輸送ができ優れた輸送手段で、パイプラインの多くは地下埋設物なので、台風や竜巻などの自然災害・人為的な災害や騒音・振動に対して「防災性・安全性に優れた輸送手段」である [80]。さらに、パイプラインは地下だけではなく、地上・空中・海中に敷設することも可能である。また、少ない人力やエネルギーで輸送が可能なので輸送コストが低減できる「経済的な輸送手段」であり、クリーンかつ少量のエネルギーで済むので、環境汚染物質の排出量は少なく、「環境適用性を持った輸送手段」である [80] と思われる。

本研究の細管内移動体は、このパイプライン対策に対して大変役に立つ研究であると思われる。細管内移動を応用すれば、さらにパイプを使った輸送が可能となり、小物物流としての機能をはたす可能性があると思われる。本研究の細管内移動体は、カプセル輸送として雨風による輸送の影響を受けず、本研究で使用したアクチュエータを利用すれば、移動中に排出ガスも出さずに管内走行することが可能である。

謝 辞

本研究の開始当初から常に暖かいご指導とご助言を賜り、大変お世話になった宇都宮大学工学部佐藤啓仁教授に心から万謝の意を表し上げたいと思います。佐藤先生のご協力がなかったら、本研究は完成しなかったと思います。

また、本研究の遂行に際し貴重なご指導とご助言を賜りました宇都宮大学工学部進村武男教授、畑沢鉄三教授に深甚なる感謝の意を表します。宇都宮大学工学部横田和隆助教授には本研究の遂行にあたり、貴重なご助言と本論文において有益なご教示をいただき感謝申し上げます。宇都宮大学工学部吉田勝俊助教授には本研究の実施に際し、常に有益なご助言と細部に亘るご示唆をいただき厚く感謝申し上げます。

さらに、宇都宮大学工学部長及び技術部長であります山本純雄教授に際しましては、本研究を行うにあたり適切なご指導と有益なご助言をいただき、低頭して感謝申し上げます。

細管内移動体の研究は、昭和 61 年頃から始められた研究であり、その間実に多くの方々のご協力をいただきました。宇都宮大学工学部尾崎功一助教授、大分工業高等専門学校の軽部周氏、呉勇周氏、華東理工大学の肖民氏、宇都宮大学付属ものづくり創成工学センターの渡辺信一氏、宇都宮大学大学院博士課程後期の福田徹氏、大根田浩久氏、博士課程前期の富山雅人君、廻谷修一君を始めシステム力学研究室の学生諸氏の協力に感謝いたします。

そして、宇都宮大学を卒業された遠藤直人氏、齊木健一氏、工藤功琢氏、田中佑果氏、岡本崇氏、橋本浩之諸氏の本研究に際して多大なるご協力をいただき感謝いたします。

宇都宮大学工学部技術部職員として日常業務をこなしながらの研究活動の中で、機械システム工学科同僚の会沢利夫氏、直井貞司氏、浦井勇氏、上野秀雄氏、小河原稔氏、渡部英男氏には、常に暖かいご声援をいただき、大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

最後に、本研究を続けていく上でいろいろと健康面に気を使ってもらいながら、多大な労苦を掛けた妻絹子、長女梨乃、長男雅弘に対し、研究の完成まで力強く声援を送ってくれたことに心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, コロナ社, (1990), 321-322.
- [2] 田中基八郎, 大久保信行, 振動をみる, オーム社, (1994), 2-25.
- [3] 横山泰男・岡部佐規一・石川憲一・小泉邦雄, 振動応用技術, 工業調査会, (1992), 79.
- [4] 吉川茂・藤田肇, 基礎音響学—振動・波動・音波—, 講談社, (2002), 79-80.
- [5] A.P., 平松惇・安福精一監訳, MIT 物理, 振動・物理, 培風館, (1986), 220.
- [6] Yoshiki Hashimoto, Yoshikazu Koike and Sadayuki Ueha, Acoustic levitation of planar objects using a longitudinal vibration mode, J. Acoust. Soc. Jpn., (E)16-3, (1995), 189.
- [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.
- [8] 橋本芳樹・小池義和・上羽貞行, 超音波浮揚を利用した非接触物質搬送Ⅱ—搬送法に関する基本的検討—, 日本音響学会講演論文集, (1994), 1015.
- [9] 日本機械学会編, 機械工学便覧 C4, 丸善, (1989), 40-41.
- [10] 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, コロナ社, (1990), 144-146.
- [11] 日立精機機電グループ, 機械現場の基礎電気<機械まわりの電気入門>, 技術評論社, (1979), 70-73.
- [12] 内野研二, 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版, (1986), 82-84.
- [13] 三留秀人, 超音波浮揚とアコースティック・ストリーミング, 超音波テクノ, 5-1(1993), 45.
- [14] 羽田野甫・梶谷真裕, 超音波浮揚, 超音波テクノ, 6-1, (1994), 47.
- [15] 上村平八郎・東久雄, 超音波による液滴の浮揚, 超音波テクノ, 6-8, (1994), 37.
- [16] 三留秀人, 音波の非線形現象とは? 「音波浮揚と音響流」, 超音波テクノ, 7-9, (1995), 63.
- [17] 橋本芳樹, 超音波を利用した非接触物質搬送, 超音波テクノ, 7-10, (1995), 48.
- [18] 安田賢二・梅村晋一郎・武田一男, 超音波輻射圧を用いた微粒子連続濃縮, 超音波テクノ, 7-12(1995), 53.
- [19] 佐藤啓仁・鎌田治・高津宣夫・森屋進, 振動滑走子に関する基礎的研究, 機論, 46-407, C(1980), 734-740.

- [20] 山本純雄・佐藤啓仁・福島裕人・斉藤秀次郎, 弾性毛を用いた円筒内移動体について, 機論, 54-506, C(1988), 2471-2474.
- [21] 日本機械学会編, 機械工学便覧 C. エンジニアリング編, 丸善, (1989), c4-1.
- [22] 福田敏男・新井史人, マイクロアクチュエータの最近の動向, 機誌, 96-899, (1993), 868-871.
- [23] 中田毅・森川泰・松熊昭憲, 光アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, 15-3, (1997), 338-341.
- [24] アクチュエータ研究会, ミクロをめざすニューアクチュエータ, 工業調査会, (1994), 59-69.
- [25] 斎藤秀次郎・佐藤啓仁・工藤功琢・齊木健一, 超音波による細管内移動カプセルの研究, 機論, 68-669, C(2002), 1414-1419.
- [26] 鶴田和弘・笹谷卓也・川原伸章, 配管内検査マイクロマシンの開発, 建設設備と配管工事, 38-3, (2000), 6-10.
- [27] 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.
- [28] 舟久保照康, 形状記憶合金, 産業図書, (1984), 167-176.
- [29] 中田毅・森川泰・松熊昭憲, 光アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, 15-3, (1997), 338-341.
- [30] アクチュエータ研究会編, ミクロをめざすニューアクチュエータ, 工業調査会, (1994), 123-135.
- [31] 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, コロナ社, (1990), 378-379.
- [32] 鶴戸口英善・川田雄一・倉西正嗣, 材料力学上巻, 裳華房, (1957), 217.
- [33] チモシェンコ, (仲威雄・瀧川馨一・久田俊彦訳), 挫屈理論, コロナ社, (1953), 48.
- [34] 横山恭男, オートメーション, 日刊工業新聞社, 19-8, (1974), 93.
- [35] 横山泰男・岡部佐規一・石川憲一・小泉邦雄, 振動応用技術, 工業調査会, (1992), 111-113.
- [36] 日本機械学会編, 機械工学便覧 C3, 丸善, (1989), 4-73.
- [37] 佐藤啓仁・鎌田治・高津宣夫・森屋進, 振動滑走子に関する基礎的研究, 機論, 46-407, C(1980), 734.
- [38] 横山泰男・岡部佐規一・石川憲一・小泉邦雄, 振動応用技術, 工業調査会, (1992), 111-113.
- [39] 横山恭男, オートメーション, 日刊工業新聞社, 19-8, (1974), 93.
- [40] 福田敏男・新井史人, マイクロアクチュエータの最近の動向, 機誌, 96-899, (1993), 868-871.
- [41] 中田毅・森川泰・松熊昭憲, 光アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, 15-3, (1997), 338-341.
- [42] アクチュエータ研究会, ミクロをめざすニューアクチュエータ, 工業調査会, (1994), 59-97.

- [43] 齋藤秀次郎・佐藤啓仁・工藤功琢・齊木健一, 超音波による細管内移動カプセルの研究, 機論, 68-669, C(2002), 1414-1419.
- [44] 鶴田和弘・笹谷卓也・川原伸章, 配管内検査マイクロマシンの開発, 建設設備と配管工事, 38-3, (2000), 6-10.
- [45] 横山恭男, オートメーション, 日刊工業新聞社, 19-8, (1974), 93.
- [46] 三井田惇郎, 音響工学, 昭晃堂, (1987), 132-133.
- [47] 根岸勝雄・高木堅志郎, 超音波技術, 東京大学出版会, (1984), 152.
- [48] 齋藤秀次郎・佐藤啓仁・齊木健一, 超音波を用いた細管内移動体の研究, 機論, 70-694, c(2004), 1644-1650.
- [49] 横山恭男・岡部佐規一・石川憲一・小泉邦雄, 振動応用技術, 工業調査会, (1992), 49.
- [50] 佐藤啓仁・山本純雄・齋藤秀次郎・池原忠好, 圧電素子を用いた円管内移動体について, 機論, 57-538, c(1991), 1860-1865.
- [51] 齋藤秀次郎・佐藤啓仁・工藤功琢・佐藤和浩, 細管内自走移動体の基礎研究, 機論, 66-641, c(2000), 346-353.
- [52] 東京大学マイクロマシン研究共同体, 超技術マイクロマシン, NTT 出版, (1993), 183-184.
- [53] Hidejiro Saito, Keijin Sato, Kazutaka Yokota and Naoto Endo, A Study on A Micro Mover Driven by Ultrasonic Waves, Ultrasonics Elsevier Science journals, Vol.43, No.7, (2005), 524-530. Ultrasonics Elsevier Science journals Vol.43, No.7
- [54] スラリー輸送研究会, スラリー・カプセル輸送技術要覧, 開発問題研究所, (1984), 19-20.
- [55] スラリー輸送研究会, スラリー・カプセル輸送技術要覧, 開発問題研究所, (1984), 417-422.
- [56] 辻裕, 空気輸送の基礎, 養賢堂, (1984), 138.
- [57] 横山恭男, オートメーション, 日刊工業新聞社, 19-8, (1974), 93.
- [58] 谷腰欣司, 超音波とその使い方, 日刊工業新聞社, (1994), 89-90.
- [59] 齋藤秀次郎・佐藤啓仁・工藤功琢・齊木健一, 超音波による細管内移動カプセルの研究, 機論, 68-669, c(2002), 1414-1419.
- [60] 谷腰欣司, 超音波とその使い方, 日刊工業新聞社, (1994), 89-90.
- [61] 三井田惇郎, 音響工学, 昭晃堂, (1987), 133.
- [62] 根岸勝雄・高木堅志郎, 超音波技術, 東京大学出版会, (1984), 152.
- [63] 齋藤秀次郎・佐藤啓仁・田中芳明, 超音波を用いた細管内前後移動カプセルの研究, 機論, 71-702, c(2005), 497-504.
- [64] 日本機械学会編, 機械工学便覧 C3, 丸善, (1989), 1-2.
- [65] 松浦弘幸, 熱ゆらぎと共存する微小機械, パリティ, 11-11, (1996), 48-60.
- [66] 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, 7-9(1995), 63-64.

- [67] 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.
- [68] 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, コロナ社, (1990), 378-379.
- [69] 斎藤秀次郎・佐藤啓仁・工藤功琢・齊木健一, 超音波による細管内移動カプセルの研究, 機論, 68-669, c(2002), 1414-1419.
- [70] 佐藤啓仁・鎌田治・高津宜夫・森屋進, 振動滑走子に関する基礎的研究, 機論, 46-407, C(1980), 734.
- [71] 鶴戸口英善・川田雄一・倉西正嗣, 材料力学上巻, 裳華房, (1957), 217.
- [72] チモシエンコ, (仲威雄・瀧川馨一・久田俊彦訳), 挫屈理論, コロナ社, (1953), 48.
- [73] 横山恭男, オートメーション, 日刊工業新聞社, 19-8, (1974), 93.
- [74] 河西健次・津久井英貴, 図解よくわかるこれからの物流, (2003), 32-41.
- [75] 横山泰男・岡部佐規一・石川憲一・小泉邦雄, 振動応用技術, 工業調査会, (1992), 111-113.
- [76] トランジスタ技術編集部, メカトロ・センサ活用ハンドブック, CQ 出版社, (1988), 169-173.
- [77] 国領英雄, 現代物流概論, 成山堂書店, (2003), 1-39.
- [78] 中田信哉・橋本雅隆, 入門の入門物流のしくみ, (2002), 10-49.
- [79] 河西健次・津久井英喜, 図解よくわかるこれからの物流, 同文館出版, (2003), 150.
- [80] 三木季雄, パイプライン立国のすすめ, 日本工業出版, (2002), 2.

参考論文等目録 (博士論文の内容の一部)

学・協会誌等論文

1. 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, 山本純雄, 斎藤秀次郎, 池原忠好

日本機械学会論文集 C 編, 第 57 巻, 第 538 号, 1860 頁~1865 頁, 1991 年に掲載 [本論文第 3 章第 3.4 節の内容の一部]

2. 細管内自走移動体の基礎研究

斎藤秀次郎, 佐藤啓仁, 工藤功琢, 佐藤和浩

日本機械学会論文集 C 編, 第 66 巻, 第 641 号, 346 頁~353 頁, 2000 年に掲載 [本論文第 3 章第 3.4 節の内容の一部]

3. 超音波による細管内移動カプセルの研究

斎藤秀次郎, 佐藤啓仁, 工藤功琢, 齊木健一

日本機械学会論文集 C 編, 第 68 巻, 第 669 号, 1414 頁~1419 頁, 2002 年に掲載 [本論文第 4 章第 4.2 節, 第 6 章第 6.3 節, 第 7 章第 7.2 節の内容の一部]

4. 超音波を用いた細管内移動体の研究

斎藤秀次郎, 佐藤啓仁, 齊木健一

日本機械学会論文集 C 編, 第 70 巻, 第 694 号, 1644 頁~1650 頁, 2004 年に掲載 [本論文第 4 章第 4.2 節, 第 6 章第 6.3 節の内容の一部]

5. 超音波を用いた細管内前後移動カプセルの研究

斎藤秀次郎, 佐藤啓仁, 田中芳明

日本機械学会論文集 C 編, 第 71 巻, 第 702 号, 497 頁~504 頁, 2005 年に掲載 [本論文第 6 章第 6.3 節, 第 6.4 節, 第 7 章第 7.2 節の内容の一部]

6. A Study on A Micro Mover Driven by Ultrasonic Waves

Hidejiro Saito, Keijin Sato, Kazutaka Yokota and Naoto Endo

Ultrasonics Vol.43, No.7 524 頁~530 頁. 2005 年に掲載 [本論文第

4章第4.2節, 第6章第6.3節, 第7章第7.2節の内容の一部]

口頭発表論文(発表者には, アンダーラインを付すこと.)

1. 細管内移動カプセルの開発

岡本崇, 佐藤啓仁, 吉田勝俊, 斎藤秀次郎

日本機械学会, 宇都宮大会, 2002年9月

2. 圧電素子を用いた壁面間及び片壁面移動体の研究

橋本浩之, 佐藤啓仁, 吉田勝俊, 斎藤秀次郎

日本機械学会, 桐生大会, 2003年9月

3. 細管内移動カプセルの開発

富山雅人, 佐藤啓仁, 吉田勝俊, 斎藤秀次郎, 岡本崇

日本機械学会, 宮代大会, 2004年9月

4. 細管内移動カプセルの開発

廻谷修一, 佐藤啓仁, 吉田勝俊, 斎藤秀次郎, 橋本浩之

日本機械学会, 宮代大会, 2004年9月

その他参考となる既発表論文等目録

学・協会誌等論文

1. 弾性毛を用いた円筒内移動体について(機構と基本的機能)

山本純雄, 佐藤啓仁, 福島裕人, 斎藤秀次郎

日本機械学会論文集C編, 第54巻, 第506号, 2471頁~2474頁

1988年に掲載