

博士論文

精密機器へ導入する超音波モータの  
小型化と制御に関する研究

2020 年

小松 和三

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 様々な環境で使用されるアクチュエータ.....	1
1.1.2 超音波モータを使用した装置と制御方法.....	2
1.2 研究目的と構成.....	3
1.2.1 研究目的.....	3
1.2.2 本論文の構成.....	3
第2章 超音波モータ.....	7
2.1 超音波モータの特徴.....	7
2.2 超音波モータの種類と駆動原理.....	10
2.2.1 進行波型超音波モータ.....	10
2.2.2 定在波型超音波モータ.....	12
2.2.3 スムーズインパクト駆動型超音波モータ.....	14
2.3 本章の結言.....	16
第3章 定在波型超音波モータを用いた配管内検査装置の開発.....	17
3.1 緒言.....	17
3.2 レーザー加工ヘッド.....	21
3.2.1 検査補修システム.....	21
3.2.2 構造と仕様.....	23
3.3 アクチュエータ.....	25
3.3.1 定在波型超音波アクチュエータ.....	25
3.3.2 回転ユニット.....	27
3.3.3 直動ユニット.....	29
3.4 アクチュエータユニットの回転性能.....	31
3.4.1 駆動回路.....	31
3.4.2 回転性能検証装置.....	33
3.4.3 回転性能検証実験の結果.....	35
3.5 レーザー加工ヘッドの駆動性能.....	37
3.5.1 低速駆動法.....	37
3.5.2 回転動作.....	39
3.5.3 直動動作.....	41

3.6	本章の結言.....	43
第4章	板状部材を用いた超音波モータの開発.....	44
4.1	緒言.....	44
4.2	超音波モータの構造と駆動原理.....	46
4.3	板状部材の設計.....	49
4.4	駆動実験.....	52
4.5	性能比較.....	55
4.6	本章の結言.....	57
第5章	板状部材を用いたミニチュア超音波モータの開発.....	58
5.1	緒言.....	58
5.2	駆動原理.....	61
5.3	ステータ設計.....	63
5.3.1	ステータの構造.....	63
5.3.2	モード解析.....	65
5.4	ステータの基礎特性.....	68
5.5	駆動実験.....	71
5.5.1	実験概要.....	71
5.5.2	駆動性能.....	74
5.6	性能比較.....	76
5.7	本章の結言.....	78
第6章	超音波モータの位置制御.....	79
6.1	緒言.....	79
6.2	超音波モータの特性.....	80
6.3	制御系の構成.....	84
6.3.1	2自由度制御系.....	84
6.3.2	適応アルゴリズム.....	87
6.4	実験結果.....	90
6.4.1	無負荷の場合の結果.....	90
6.4.2	負荷がある場合の結果.....	94
6.5	本章の結言.....	98
第7章	結論.....	99

参考文献.....	101
謝辞.....	106
研究業績.....	107

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

近年、産業工場や電力供給施設などでは、様々な流体を搬送するために多くの配管が設置されているが、これらの配管は施設の安全確保や生産性の向上のため定期的に検査を行う必要がある。現在、広く用いられている配管の検査方法として、超音波探傷検査（UT：Ultrasonic Testing）や渦電流探傷検査（ECT：Eddy Current Test）などが挙げられる。また、内視鏡検査法もよく用いられており、配管内へ内視鏡を挿入することで、人間が直接検査することができない狭小空間や小口径の配管にも適用することができる。この内視鏡を用いた配管内の検査装置には、CCD カメラや光ファイバースコープを用いた装置が挙げられる。しかしながら、これらの配管検査方法では、配管に損傷が見つかったとしても、その場で補修を行なうことができず、配管の施栓や交換によって対処しており、配管のメンテナンスや交換作業には多大な労力と時間を要するなどの問題があり、事故や故障を未然に防ぐためには、施設の稼働停止時間を可能な限り短くしつつ、検査や補修の迅速な対応が重要となる。これまで、様々な原理のアクチュエータを用いて、各種サイズの配管や狭小空間内で使用される装置が開発されてきたが、直径が 25 mm より細い配管に対応した配管内部の検査と補修を同時に行える装置は、まだ開発されていない。

### 1.1.1 様々な環境で使用されるアクチュエータ

汎用的なアクチュエータには、電磁モータや、油圧・空気圧アクチュエータなどが一般的に広く用いられている<sup>[1-3]</sup>。また、近年、様々なロボットが開発されており、例えば、災害現場で活躍できるロボットや狭小空間内である配管設備を自走することができるロボットなどが挙げられ、それぞれの用途に応じた形状や性能を有している。配管などの狭小空間を検査する装置の例として、狭小空間で使用することができるロボットには、弾性クローラを用いた管内を走行する装置が永瀬らによって開発されている<sup>[4]</sup>。この装置はクローラ型ロボットで配管内の腐食等による凹凸がある場合でも走行することができ、曲がり管部分の走行も可能となっている。また、Yamamoto らは、空気圧式アクチュエータを用いたロボットを開発した<sup>[5]</sup>。この装置は狭い配管内やオープンなスペースを自由に移動できる柔軟性があるロボットである。さらに、しゃくとり虫型のロボットとして、Byungkyu らは、直径 9.5 mm 長さ 50 mm の形状記憶合金を利用したロボットを開発した<sup>[6]</sup>。その他に、岡らは、高速増殖炉の熱交換器に

使われている直径 25 mm の配管内を、検査・補修することができるレーザー加工ヘッドを開発している<sup>[7,8]</sup>。このように、様々な駆動原理のアクチュエータを用いて、各種サイズの配管や狭小空間内で使用される装置が開発されている。

一方、出力は小さいが、さらに小型のアクチュエータの開発も進められている。例えば、Gorissen らは、低侵襲手術を目的として、空気圧を利用したバルーンを用いた小型のマイクロアクチュエータを開発している<sup>[9]</sup>。電磁アクチュエータでは、Tsai らは、直径約 2 mm、長さ約 6 mm の小型モータを用いた光干渉断層撮影 (OCT: Optical coherence tomography) による血管内をイメージングする内視鏡を開発した<sup>[10]</sup>。また、Ueno らは、電気共役流体 (EFC: Electro-Conjugate Fluid) をもちいたロボットを開発している<sup>[11]</sup>。このように、電磁モータを用いたロボットや、小型の電磁型アクチュエータ、さらには空気圧を利用するなど、様々なアクチュエータの開発が進められている。しかしながら、このような電磁型アクチュエータは部品点数が多くなる傾向にあり、さらなる小型化を想定した場合には、その大きさや出力については限界があり適していない。

このように狭小空間内で使用できる様々な装置が開発されているが、狭小空間内で稼働する装置そのものが小型である必要があり、これらの装置に搭載するアクチュエータも小型化が必要である。しかし、直径 4 mm 以下の電磁モータも存在するが、必要なトルクを得るためには歯車などの減速機構が必要となってしまう、設置スペースの問題から使用することができない場合も想定される。そこで、小型で高トルクを実現することができる超音波モータ(以下、USM: Ultrasonic motor と略記する)を利用することが有効であると考えられる。

### 1.1.2 超音波モータを使用した装置と制御方法

一般的な USM の特徴として、以下のものが挙げられる。USM は摩擦を利用した駆動原理であるため、静止時に自己保持トルクを有する。また、電磁波が発生せず、非磁性体で製作が可能であることから、医療用機器や福祉用機器のアクチュエータとしての研究や、医療現場の磁気共鳴映像法 (以下、MRI: Magnetic resonance imaging と略記する) 下で使用する機器のアクチュエータとして使用されている<sup>[12-17]</sup>。

さらに、電磁型モータと比較すると部品点数が少なく、減速機が不要である点が大きな特徴である。また、小型化が可能で、軽量、かつ回転子にコイルを用いないため、中空構造で製作が可能であり、制御性や応答性に優れている。USM の実用例として、カメラのオートフォーカス機構や、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning electron microscope) や原子力間顕微鏡 (AFM: Atomic force microscope) の精密位置決めステージ

や、腕時計内部のアクチュエータとして実装されている<sup>[18-20]</sup>。しかしながら、これまで開発されてきた USM の多くは、使用用途が限定的であり、複数個の圧電素子を使用しなければ物体の双方向駆動を実現することが出来なかった。

一方、USM の入出力特性は本質的に非線形であり、圧電素子の誘電損失による発熱や、摩擦熱の温度上昇、負荷の影響などにより回転速度特性が大きく変動する<sup>[13,14,21,22]</sup>。このため、USM を制御する場合、固定ゲインを用いた PID 制御のみでは、高精度な位置決め制御は困難であるため、2 自由度制御系のフィードフォワード項により目標値応答特性を保持した上でフィードバック補償を行った方法が提案された<sup>[17]</sup>。また、ニューラルネットワークや入力電圧情報に基づき回転子の位置を推定し、センサレスで位置制御を行う方法<sup>[23,24]</sup> など、様々な制御手法が提案されている<sup>[25-28]</sup>。しかし、USM の特性変動に対して PID 制御における各ゲインを、ニューラルネットワークや PSO (Particle swarm optimization) などにより適応的に調整し、制御性能を補償する方法が提案されている<sup>[29-31]</sup>が、簡易的な適応アルゴリズムで補償する方法はいまだ提案されていない。

## 1.2 研究目的と構成

### 1.2.1 研究目的

本論文では、USM の産業応用に関する研究として、アクチュエータに USM を利用することで、これまで対応出来なかった 1/2 インチサイズの配管に対して、損傷箇所の検査と補修が可能な装置の開発とその性能検証、また、これまで開発されてこなかった圧電素子を 1 つのみを使用したとシンプルな構造で双方向駆動を可能とする USM の開発とその小型化の検討、さらにループゲイン 1 つの調整でフィードバック特性を改善できる簡易的手法による USM の位置制御法を提案することを目的とする。このように、様々な機器に応用可能な USM を使用した機器開発と新たな USM の開発は、これからの産業界に大きく貢献できるものと考えられる。

### 1.2.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1 に示す。

第 1 章では本研究の背景と目的について述べる。

第 2 章では、USM の代表的な駆動原理と、その特徴や使用されている機器について述べる。

第 3 章では、「定在波型超音波モータを用いた配管内検査装置の開発」について述べる。産業工場や電力供給施設において熱交換器などの流体搬送用配管が

多用されており、この配管内部の検査補修装置の開発が求められている。これまで開発された装置は、使用されるアクチュエータの原理や構造上の制限から、配管直径が 25 mm より小さい配管には対応することができないのが現状であった。そこで、本章ではアクチュエータに USM を用いた 1/2 インチサイズの配管に対応し、配管内の損傷箇所を目視で確認することができる低速駆動が可能な検査補修装置を開発した。開発した装置の直径は 11 mm であり、2 つの圧電素子を直行配置した定在波型 USM を使用し、光ファイバスコープを通す中空部を確保した上で回転駆動および直動駆動が可能な装置である。本装置の動作検証を行った結果について述べる。

第 4 章では、「板状部材を用いた超音波モータの開発」について述べる。第 3 章で開発した配管内検査補修装置に用いた USM は、1 軸駆動に 6 個の圧電素子を用いているため、回転駆動・直動駆動を実現するには合計 12 個の圧電素子を必要とし、電気配線が多く複雑な構造となってしまうことや、さらなる装置の小型化には限界があった。さらに、物体を双方向に駆動するためには 2 個以上の圧電素子が必要である。そこで、著者らは、これまで提案されてこなかった複数個の圧電素子を利用するのではなく、圧電素子 1 つのみを使用して、物体の双方向駆動を可能とする新しい USM を開発した<sup>[32,33]</sup>。開発した USM のサイズは約  $10 \times 3 \times 2.4$  mm であり、1 つの圧電素子と板状部材を直列配置したシンプルな構造のモータである。本モータは圧電素子の変位量が板状部材のたわみ変形により変位が拡大される機構であり、駆動原理は板状部材を物体に押し付け、振動の往復運動速度を変えることにより双方向に回転駆動させる。回転駆動実験では双方向駆動を確認し、駆動性能を検証する。

第 5 章では、「板状部材を用いたミニチュア超音波モータの開発」について述べる。小型電子機器等への実装が可能な大きさの USM の小型化が必要となる。本章では、第 4 章で開発した USM で使用した圧電素子をさらに小さな圧電素子に置き換えることで、小型化が可能となり、駆動電圧も低く抑えることができ、さらに曲げ加工した板状部材と圧電素子を組み合わせたミニチュア USM の開発を目的とした。開発した USM はステータの全長が圧電素子の長さに板状部材の板厚を加えた大きさで約  $2.7 \times 2.2 \times 1.2$  mm であり、板状部材が予圧調整機構を兼ねる構造となっている。その駆動原理は板状部材を物体に押し付け、振動の往復運動速度を変えることにより双方向に回転駆動させる。回転駆動実験では双方向駆動を確認し、駆動性能を検証する。

第 6 章では、「超音波モータの位置制御」について述べる。USM を機器に実装する場合、USM の位置制御が必要となる。しかし、USM は摩擦駆動方式であるため、負荷変動や温度上昇などの影響から、その動特性は大きく変動し、制御性能が低下してしまう。これまで、USM の特性変動に対して PID 制御における



各ゲインをニューラルネットワークや PSO(Particle swarm optimization)などにより適応的に調整し、制御性能を補償する方法が提案されているが、簡易的な適応アルゴリズムで補償する方法はいまだ提案されていない。本章では、USMの回転速度の低下を定常ゲインが低減したとみなし、ループゲインを一定値に保つ簡易的な適応アルゴリズムを導入した2自由度制御法を提案する。本手法は、1つのゲイン調整のみで制御性能を補償でき、その有効性はUSMを用いた実機実験により検証する。

第7章では、結論として、産業への適応を想定したUSMに関する研究として、精密機器に応用するUSMの開発とその位置制御法についてまとめ、今後の課題と展望を述べる。

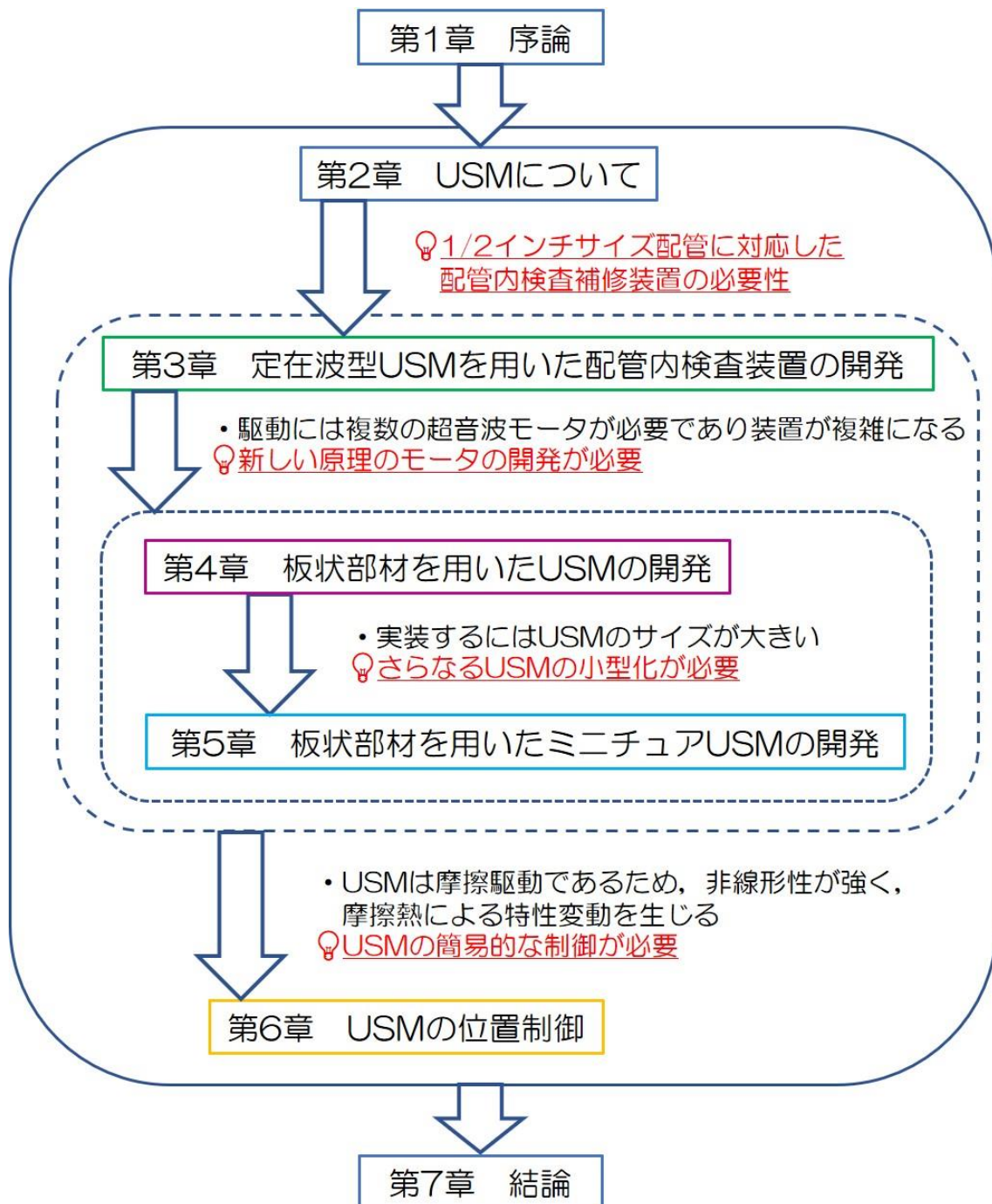


図 1.1 本論文の構成

## 第2章 超音波モータ

本章では、USMの概要として、その特徴や利点・欠点について述べる。また、USMは駆動原理の違いにより、進行波型、定在波型、スムーズインパクト駆動型（以下、SIDM: Smooth impact drive mechanismと略記する）の3つに大別される<sup>[12-14,34]</sup>。以下に、それぞれの特徴、駆動原理について述べる。

### 2.1 超音波モータの特徴

USMは圧電素子に印加された電気エネルギーを、超音波振動に変換して機械的エネルギーを生成し、この振動を物体に伝えることで物体を駆動するアクチュエータであり、駆動周波数が人間の可聴音域の50 Hz~20 kHzを超えていることからUSMと呼ばれている<sup>[12]</sup>。このUSMの大きな特徴として、摩擦を利用した駆動原理であるため、歯車などの減速機構が不要であり、物体をダイレクトに駆動することが可能である。

USMの歴史は浅く、1973年にH.V.Barthが圧電素子から出る超音波振動エネルギーをモータの駆動方式に取り入れることで提案した。提案された最初のUSMの駆動原理を図2.1に示す<sup>[13]</sup>。この駆動原理はロータに2つのホーンが押し付けられている構造となっている。一方のホーンを駆動するとロータは回転し、もう一方のホーンを駆動するとロータが逆回転する原理である。しかしながら、当時の技術では、温度上昇の影響から一定振動振幅を維持することや、駆動面の摩耗の対策が問題となり、実用化には至らなかった。

その後、1980年に指田が最も基本的な方式である振動片型のUSMを開発し、1982年に正転・逆転が可能な進行波型USMが開発された<sup>[12-14]</sup>。1986年に(株)新生工業がUSR60-4-100として販売した後、カメラメーカーや精密メーカーが実用化に乗り出した<sup>[35]</sup>。この進行波型USMは最も多く利用されている原理の一つであり、現在は性能が向上し製品化がされており、複数のメーカーから購入することが可能である。

また、このUSMに使用される圧電素子は、強誘電体に分類されるチタン酸バリウム( $\text{BaTiO}_3$ )やチタン酸ジルコン酸鉛(以下、PZT:  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ と略記)、最近では、非鉛圧電材料の $\text{KNbO}_3$ 系材料が挙げられるが、特にPZTは直流駆動による位置決め用アクチュエータ応用や、光学ステージ、圧電型インクジェットプリンタに用いられている<sup>[36]</sup>。また、PZTの特性として、一般に大きな変位を得るために大きな入力電圧で高速に駆動した場合、自己発熱によりキュリー温度に達し、分極が消滅してしまい、変位できなくなってしまうことが知られている<sup>[13,14,21,22]</sup>。さらに、入力電圧の大きさにかわらず共振によって大きなひずみや応力が生じると熱が発生し、共振時の最大ひ

ずみ、最大応力は共振モードの節部分で生じ、その部分で最大発熱となり、120 °C近くまで上昇し、圧電素子の使用温度範囲を超えてしまう場合もある<sup>[14]</sup>。

USM はこれまで駆動原理やステータの形状といった様々な研究開発が進められてきたが、インターネットを用いた文献検索サイト Google Scholar によると、最初の論文が1982年に掲載されてから、数多くの論文が発表されている<sup>[37]</sup>。しかし、実際に機器に搭載されるアクチュエータとして駆動しているものは、他のアクチュエータと比較するとあまり多くはない<sup>[38-40]</sup>。

以下に、USM の利点と欠点をまとめる

#### 利点

- ・減速機が不要である。
- ・低速時に高いトルクを出せる。
- ・制御性が良く、応答性も高い。
- ・速度範囲が広い。
- ・停止時に保持トルクを有する。
- ・電磁波の発生がほとんどなく、外部からの磁界や電界の影響が小さい。
- ・中空構造が可能。

#### 欠点

- ・高周波電源や複雑な回路が必要となる。
- ・堅牢性が若干劣る。
- ・効率が低い。

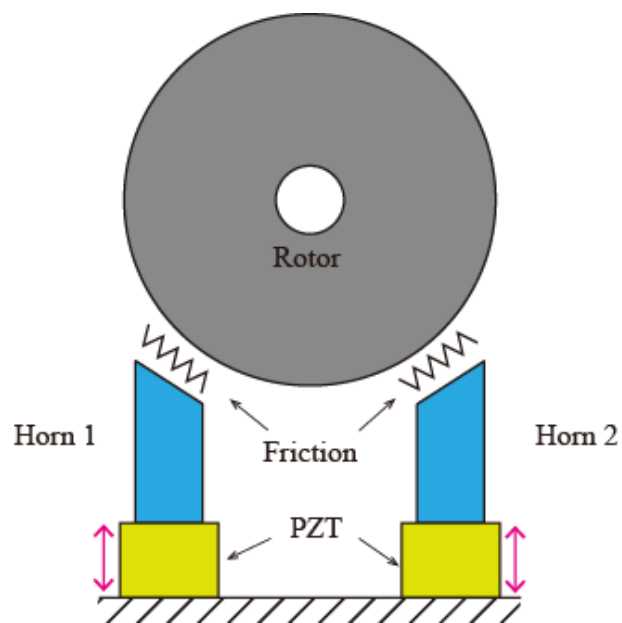


図 2.1 H.V.Barth によって提案された USM の駆動原理  
文献[13]を参考に著者が作図

## 2.2 超音波モータの種類と駆動原理

### 2.2.1 進行波型超音波モータ

進行波型 USM はサーフィン型（表面波型モータ）とも呼ばれ、時間的および空間的に  $90^\circ$  位相の異なる2つの定在波を重ね合わせて進行波を励振している。図 2.2 に（株）新生工業から販売されている進行波型 USM（USR60 シリーズ）を示す<sup>[41]</sup>。また、図 2.3 に進行波型 USM の駆動原理を示す。この USM はシャフト、ベアリング、ロータ、ステータ、圧電セラミックス、摺動部材、ベースから構成されており、ロータは常にステータに接触する必要があるため、予圧が負荷されている。ステータに貼り付けられた圧電セラミックスに電圧を印加することで進行波を発生させ、ステータ表面に楕円軌跡が生成されることでロータが回転する原理である。この進行波の向きを変えることでロータを容易に双方向駆動することができる。なお、このタイプの USM は、2つの定在波を励振するために2つの振動源を必要とすることから、効率が50%以下と高くない。また、後述する定在波型 USM と比較すると長寿命ではあるが、絶縁のために隣り合う電極間の距離を十分に確保する必要があり、小型化に適しているとはいえない<sup>[14]</sup>。

しかし、同サイズの DC モータよりもトルクが大きく、歯車などの減速機が不要であり、その形状が電磁型モータと同じ円筒型であることから導入しやすいため様々な機器で用いられている。また、電磁波を発生しないため、強磁場環境下で使用することができる長所を生かし、MRI 下で使用する機器のアクチュエータとしても利用されている<sup>[16,17]</sup>。

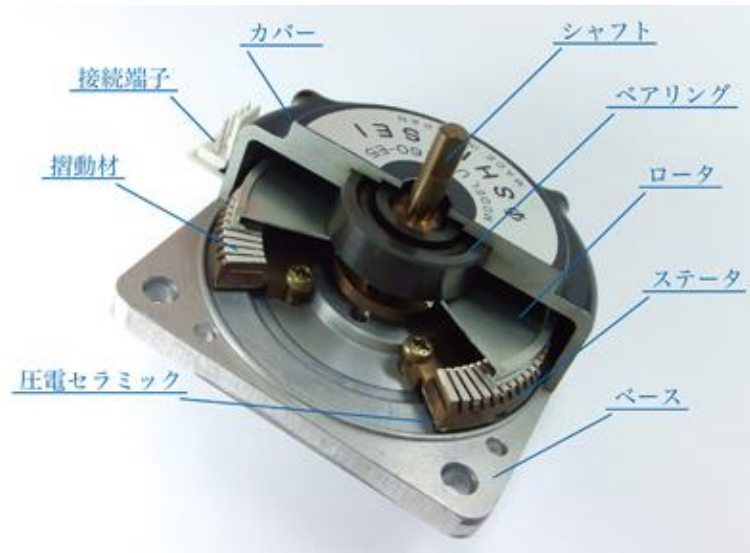


図 2.2 進行波型 USM の構造 (株) 新生工業 HP より引用<sup>[41]</sup>

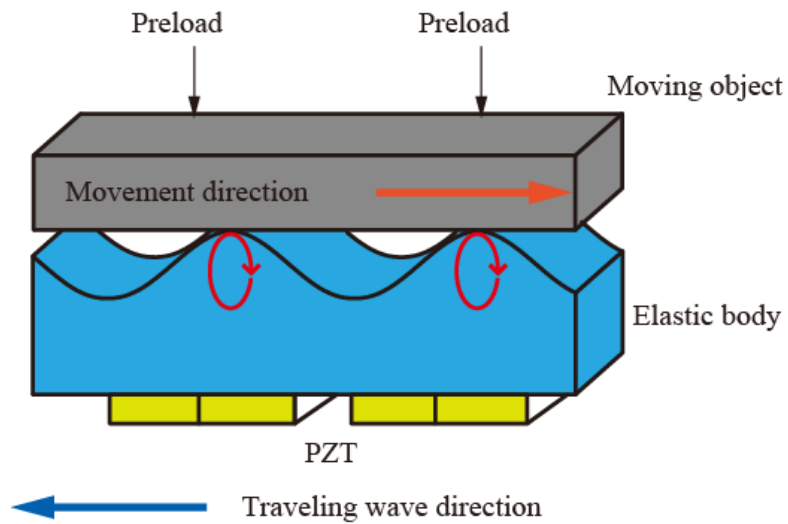


図 2.3 進行波型 USM の駆動原理 文献[41]を参考に著者が作図

## 2.2.2 定在波型超音波モータ

定在波型 USM は、進行波型 USM と比較すると、構造がシンプルであり、低コスト化しやすいのが特徴であり、一様分極、少ない配線、電源が一つで済むことから小型化に向いている。この定在波型 USM はモード変換型と複合モード型の 2 つのタイプに分けられ、モード変換型の代表的な構造のキツツキ型モータを図 2.4 に示す。この駆動原理は、縦振動子とたわみ振動片を組み合わせ、振動子で発生させた縦振動をたわみ振動片により、横振動またはねじり振動に変換させて楕円軌跡を生成し駆動を行う。次に、複合モード型である圧電素子を直交配置した構造のモータを図 2.5 に示す。このモータは直交配置した 2 個の圧電素子の交点に振動片を取り付け、片側の圧電素子を振動させ、他方の圧電素子をバネ・ダンパ要素と見なして楕円軌跡を作り、ロータを回転駆動させる。振動させる圧電素子を切り替えることで、ロータの双方方向駆動を可能にしている<sup>[14,42,43]</sup>。この複合モード型のモータは、様々な構造のモータが提案されている<sup>[44-46]</sup>。



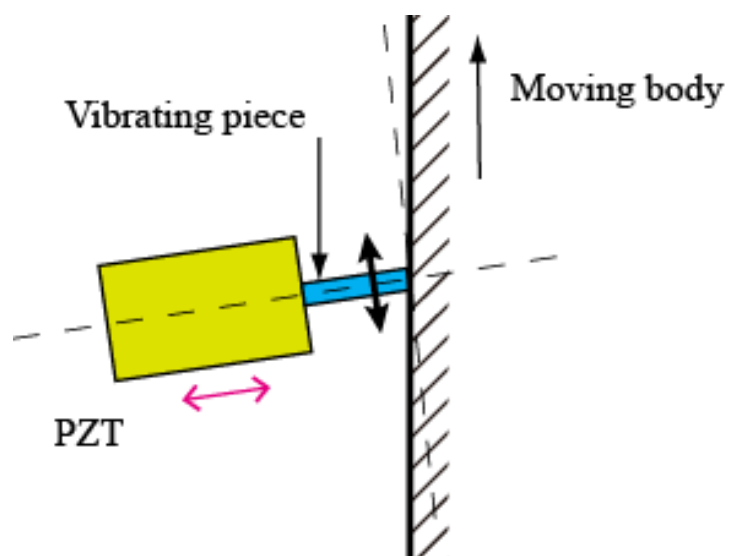


図 2.4 モード変換方モータの駆動原理 文献[14]を参考に著者が作図

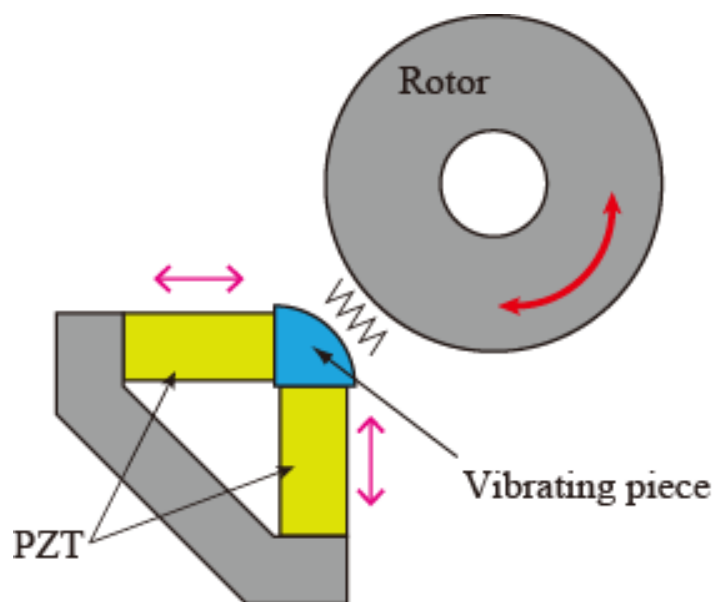


図 2.5 複合モード型モータの駆動原理

### 2.2.3 スムーズインパクト駆動型超音波モータ

進行波型 USM や定在波型 USM には分類されない SIDM 型 USM は、圧電素子が伸縮する際の慣性を利用した駆動原理のモータである。その代表的な構造として、移動体に圧電素子と摩擦部材を取付け、圧電素子の伸びと縮みの速度に差を作り、摩擦と慣性によって駆動を行う SIDM 型がある<sup>[34]</sup>。図 2.6 に SIDM 型 USM の構造と駆動原理を示す。この SIDM 型 USM は圧電素子の一端側を固定し、他端側に摩擦部材が接続されており、摩擦部材の上に移動体が設置されている構成である。

以下に駆動原理を示す。

- (1) 圧電素子をゆっくり伸ばすような電圧を印加し、摩擦部材と移動体は摩擦力により、右側へ移動する。
  - (2) その後、圧電素子を急速に縮めるような電圧を印加することで、摩擦部材と移動体間ではすべりが生じ、慣性によって移動体はその場にとどまる。
- (1), (2) を連続的に繰り返すことで、移動体を駆動することが可能となり、入力信号を調整することで、移動体を左右双方向へ駆動することができる。

このように SIDM 型 USM は、1つの圧電素子で移動体を双方向へ駆動することが可能な駆動原理であるため、小型化に適しているが、移動体の形状が限られるなどの問題が挙げられる。この SIDM 型 USM では、駆動信号にノコギリ波を用いたボルト締めランジュバン型のリニアアクチュエータ、矩形パルス波形を用いた金属プレートに圧電素子を張り付けた共振型のアクチュエータが開発されている<sup>[47,48]</sup>。

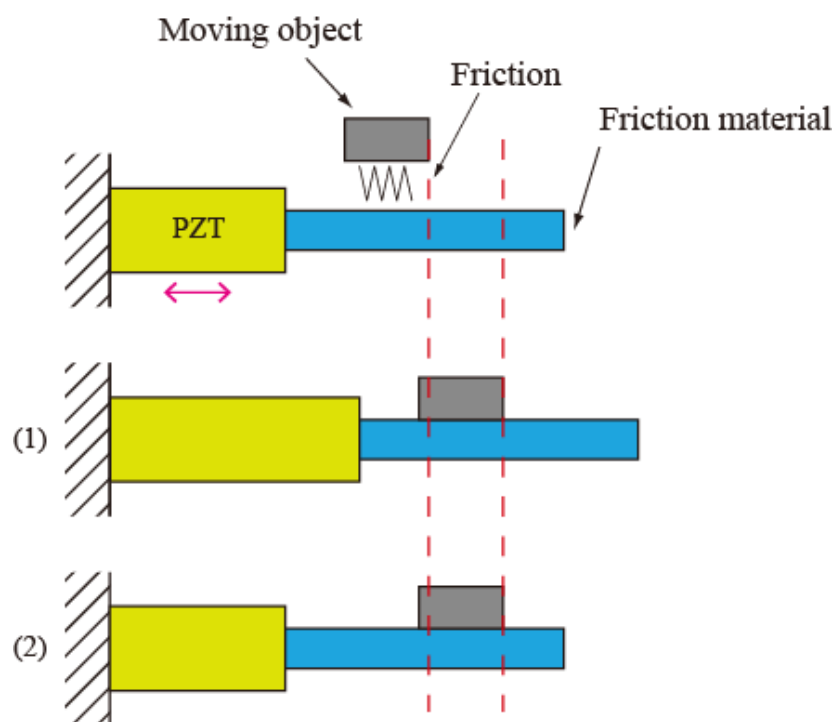


図 2.6 SIDM 型 USM の構造と駆動原理

## 2.3 本章の結言

本章では、USM の概要として、その特徴や利点や欠点、USM の代表的な駆動の種類や、それぞれの特徴、駆動原理についてまとめた。

USM は、それぞれの駆動原理に利点や欠点があるが、さらなる産業界への USM の応用展開は、使用用途に適した駆動原理の USM を選択することにより、これまで DC モータなどの電磁型アクチュエータだけでは開発が困難であった装置や、小型化、高精度化、高性能化が期待できると想定できる。

## 第 3 章 定在波型超音波モータを用いた配管内検査装置の開発

本章では、直径 1/2 インチサイズ配管内の検査および補修を行なうためのレーザー加工ヘッドの開発を目的とし、2つの圧電素子を直交して配置した定在波型 USM を使用して、直径 1/2 インチサイズ配管内で用いるレーザー加工ヘッドを開発した。その構造や動作検証実験の結果について述べる。

### 3.1 緒言

産業工場や電力供給施設などでは、様々な流体を搬送するために多くの配管が設置されているが、これらの配管は施設の安全確保や生産性の向上のため定期的に検査を行う必要がある。一般に配管内の検査では、超音波探傷検査（UT: Ultrasonic Testing）や渦電流探傷検査（ECT: Eddy Current Test）などが行われているが、近年では、CCD カメラや光ファイバスコープなどの内視鏡を用いた装置により、配管内部から検査を行なうことも多くなってきた。例として、Zhang らは、ガス管内を移動するロボットを開発した<sup>[49]</sup>。このロボットの本体は、周囲に 120 deg 間隔で配置された 3 個のパンタグラフによって構成されており、400 ~ 600 mm の範囲の直径を持つ配管に適用することができる。また、Lim らは、直径 12 mm の細い配管に使用することができる空気圧を用いたロボットを開発した<sup>[50]</sup>。このロボットは、内部への空気の注入と解放を繰り返すことで、芋虫の様に管内を這って移動する。さらに、山田らは、直径 10 mm の配管内を無線移動する検査ロボットに搭載される、マイクロカメラ視覚システムの開発を行なった<sup>[51]</sup>。このロボットでは、ミラー上に反射する画像を CCD カメラで捉えることにより、管内壁面を検査することができる。他にも開発されたロボットはあるものの、これまでの装置では、配管内の観察機能は有するものの、損傷が見つかっても補修することができず、配管の施栓や交換により対処していた。

一方、岡らは、高速増殖炉の熱交換器に使われている直径 25 mm の配管内を、検査・補修することができるレーザー加工ヘッドを開発した<sup>[7,8]</sup>。図 3.1 と図 3.2 に岡らが開発したレーザー加工ヘッドの構成と外観を示す。図より A-A 断面として可動スリーブが 1 つのナットによって前後及び回転の 2 動作を実現していることを示している。この装置は、光ファイバスコープと組み合わせて用いられ、その内部にはミラーとミラーを直動・回転させるための可動スリーブが配置されている。その機能は、光ファイバスコープでは配管の長手方向しか観察することができないが、配置したミラーにより光を配管の半径方向へ屈曲させ

ることができるため、管壁面の損傷部を目視で確認することができる。また、固定したままのミラーでは目視で確認できる範囲に限られるが、ステッピングモータによって可動スリーブを直動・回転駆動することによりミラーも同調して動き、360°方向の管壁面を観察することができる。さらに、光ファイバから補修用レーザーを照射することもできるため、配管内部の観察に加えて、損傷部の補修も行うことができ、レーザー照射点を任意の位置に制御することが出来る。実際に使用する場合には、ECT装置と組み合わせて用いられ、ECT装置でおおよその損傷場所を特定した後、本加工ヘッドを用いて損傷部を目視で確認し、必要に応じて補修を行う。また、本技術を発展させ、レーザーヘッドの精密制御が可能な配管検査補修装置の試作や、レーザー熱加工による補修技術の研究も進められている<sup>[52-54]</sup>。一方、高速増殖炉ならびにその他の施設には、様々な直径の配管があり、25 mm より太い配管には、上述の加工ヘッドに何らかの部品を組み合わせることにより対応できると考えられる。しかし、25 mm より細い配管に対しては、上述の加工ヘッドを挿入することさえできないため、細径配管内で使用できるレーザーヘッドを開発する必要がある。

本研究では、直径 1/2 インチサイズの配管内の検査補修を行なうためのレーザー加工ヘッドの開発を目的とする。この大きさにした理由は、原子力施設の配管などではインチを基準寸法としており、すでに開発した 25 mm 配管用レーザーヘッドの半分の大きさに設定したヘッドが開発できるかどうかの検討を行うためである。本レーザーヘッドは、上述した直径 25 mm 配管用レーザーヘッドと同様に、光ファイバスコープと組み合わせて用いるためファイバを通すことができる中空構造とし、可動スリーブ内に配置されるミラーを介して配管内の観察・補修ができるようにする。しかし、直径 25 mm の配管用に開発した加工ヘッドに用いたモータは、直径 6 mm のステッピングモータであるため、直径 1/2 インチの配管内ではスペースの問題から導入することができない<sup>[7,8]</sup>。また、直径 4 mm 以下の電磁モータも存在するが、トルク不足が懸念されるため導入することができない。

一方、USM は、体積比あたりのトルクが他のモータよりも大きく減速機が不要であるなどの理由により、工業や医療分野など様々な場面で用いられている。例として、Minghui や Takemura らは、ミラーを取り付けた球面を駆動する多自由度 USM を開発したが、中空構造でなければならない本レーザー加工ヘッドへ適用することはできない<sup>[55,56]</sup>。他にも様々な動作原理のモータが開発されているが、直径 1/2 インチの配管内に適用でき、かつ中空部を確保することができるモータはほとんどないのが現状である<sup>[34,57,58]</sup>。

そこで、装置の中心部分をファイバが通過するため、中空部を確保する必要がある。また、配管内を目視で観察するためには、低速で駆動する必要がある。

る。さらに、ファイバを通すための中空部を確保したまま回転速度の情報を得る必要があるため、減速機が不要である定在波型 USM を使用した。この定在波型 USM は 2 つの圧電素子を直交して配置した定在波型 USM であり、本 USM を 3 つ使用し、中空円板上に  $120^\circ$  間隔に並べてファイバスコープを通過させる空間を確保することができた。これより、直径 12 mm の配管内で用いるレーザー加工ヘッドを開発することができたため、その構造や動作検証実験の結果について報告する<sup>[43]</sup>。

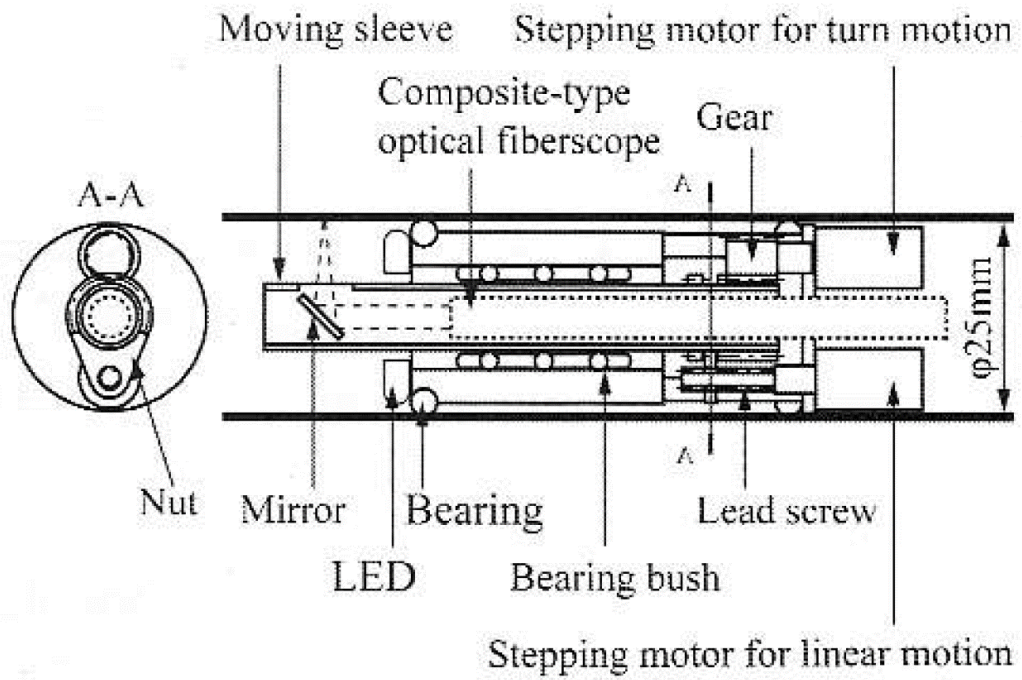


図 3.1 岡らが開発したレーザー加工ヘッドの構成<sup>[7,8]</sup>

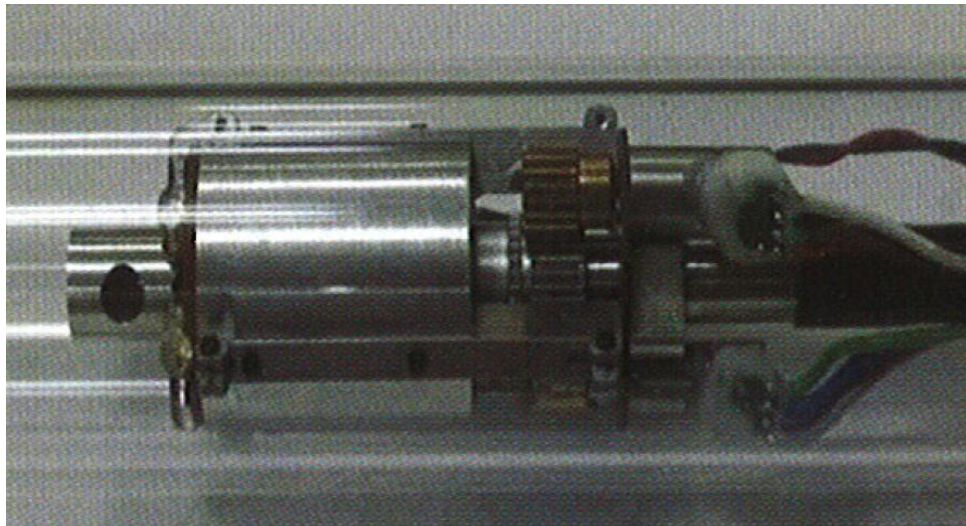


図 3.2 岡らが開発したレーザー加工ヘッドの外観<sup>[7,8]</sup>



## 3.2 レーザー加工ヘッド

### 3.2.1 検査補修システム

本研究では、原子力などの大型施設に設置される熱交換器の全長 20 m、直径 1/2 インチサイズの直管を想定し、配管内を検査・補修することができるレーザー加工ヘッドを開発する。これらの配管内で確認できる損傷の大きさは 1 mm 程度と非常に小さいため、配管内全体を光ファイバスコープで検査することは困難である。このため、図 3.3 にレーザー加工ヘッドと ECT 装置を組み合わせたシステム構成を示す。本システムを用いた配管内の検査・補修の手順は、次の通りである。

- 1) システム全体が配管内に挿入され、エアリーによって配管内を移動させる。このとき、ECT 装置を用いて配管内の損傷の有無を確認する。損傷があった場合には、配管内のおおよその場所を特定する。
- 2) レーザー加工ヘッドを損傷部付近に移動させ、ミラーを配置した可動スリーブを、回転あるいは直動動作させて、光ファイバスコープの映像として損傷部を映し出す。その結果、もし補修が必要と判断された損傷部であれば、補修用レーザーを照射して損傷部を溶接補修する。

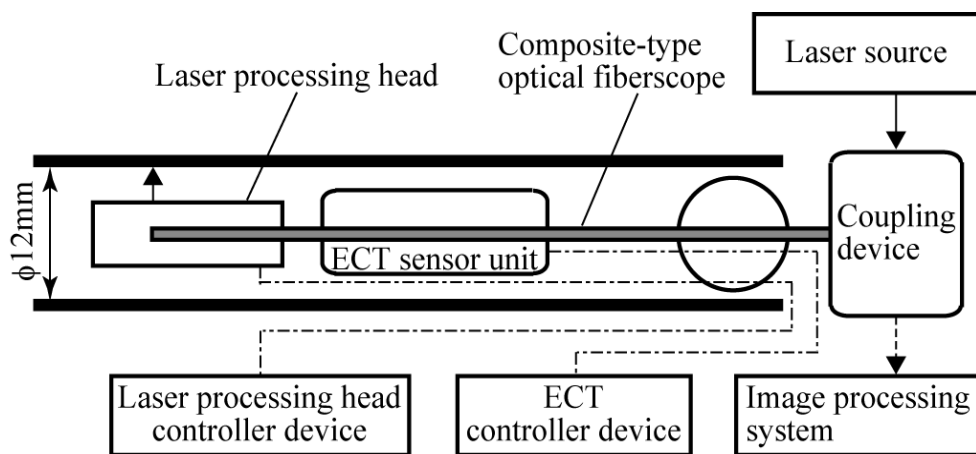


図 3.3 レーザー加工ヘッドのシステム構成

### 3.2.2 構造と仕様

図 3.4 に本レーザー加工ヘッドの構造を示す。レーザーヘッドは、光ファイバスコープ、ミラー、可動スリーブ、スリーブを回転・直動動作させるユニットで構成される。光ファイバスコープは、その先端部を自在に伸縮および屈曲させることができないため、可動スリーブに内蔵されているミラーにより、画像や溶接用補修レーザーを管内壁面方向へ屈折させるため、本構成とした。光ファイバスコープは、レーザー加工ヘッドに挿入して使用するため、本体は中空構造となっている。レーザー加工ヘッドの設計仕様を以下に示す。

- ① レーザー加工ヘッドは、今後、他の配管へも適用するため、全長 100 mm、直径 1/2 インチ以内に収まること。
- ② 光ファイバスコープを配置するために、レーザー加工ヘッドに直径 3 mm の中空部分を設けること。
- ③ 回転方向へ $\pm 185^\circ$ 、直動方向へ $\pm 2.5$  mm の動作範囲を持つ可動スリーブとすること。
- ④ 光ファイバスコープの画像やレーザーを管内壁面へ反射させるため、可動スリーブ内にミラーを設置すること。
- ⑤ モータは、中空部分の外側の直径 3~10 mm の範囲の空間内に配置すること。
- ⑥ レーザー加工ヘッドの全ての配線は、可動スリーブの動作に影響を与えないようにすること。

図 3.5 に上記の設計仕様に基づいて開発したレーザー加工ヘッドを示す。その概要は、以下の通りである。

- (a) ファイバヘッドは、全長が約 65 mm、全質量は 31g であり、ほぼ全ての部品の材質は SUS304 とした。
- (b) 部品の組み立ては、はめあいおよび接着により行った。
- (c) 本体の剛性を高めるため、本体の外周に 120°間隔でフレームを配置した。さらにモータに電圧を与えるための配線を収められるよう、フレーム側面に溝を設けた。
- (d) 超音波アクチュエータの与圧は、レーザー加工ヘッドが中空構造であるため、波ワッシャにより与えた。
- (e) 回転するロータ円盤は、超音波アクチュエータと接触し駆動されるため、ロータ円盤表面にちっ化処理（PSN 処理）を施し、疲労性や摩耗性を軽減させた。

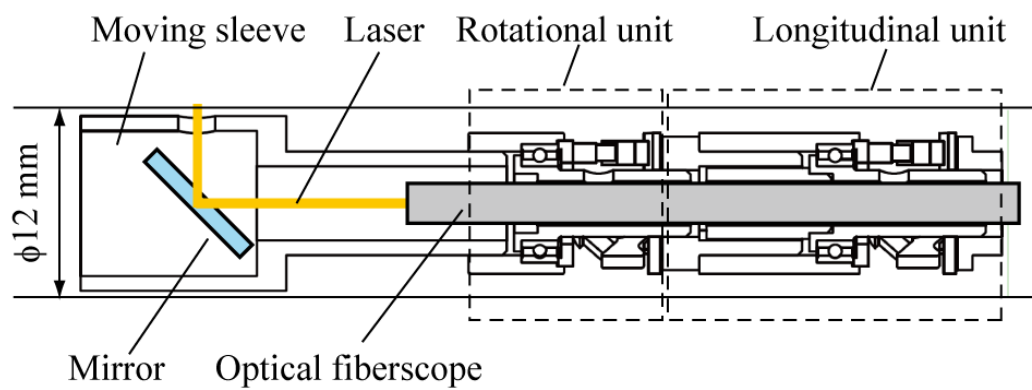


図 3.4 レーザー加工ヘッドの構造

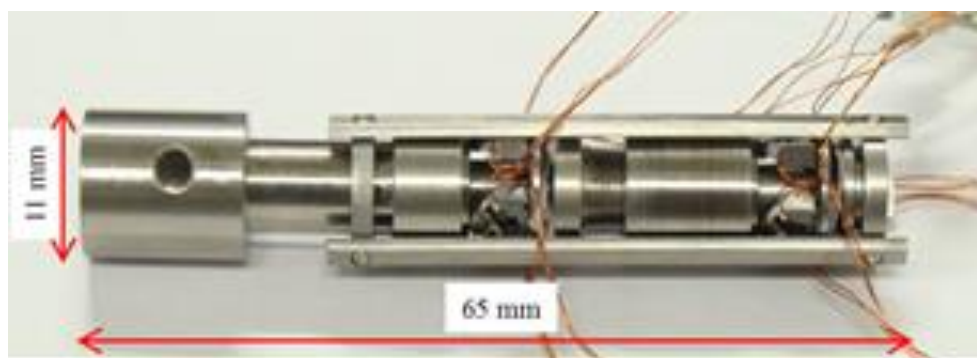


図 3.5 開発したレーザー加工ヘッド

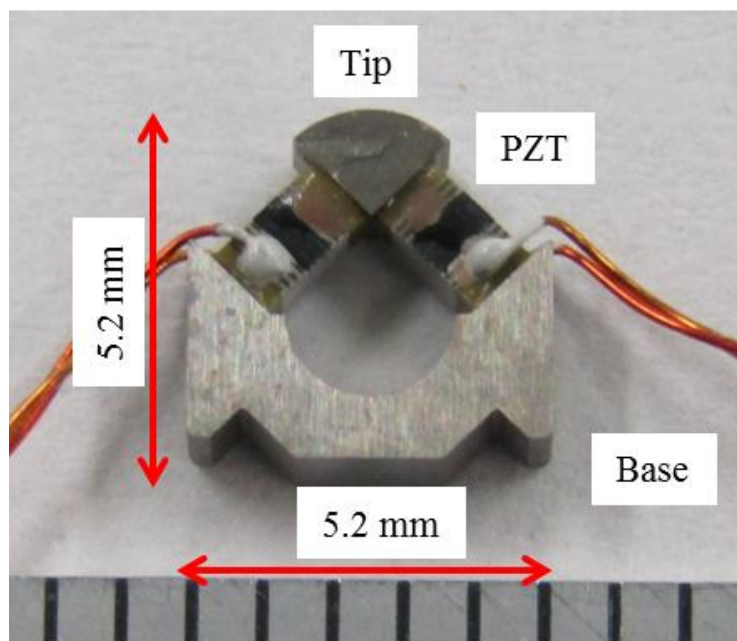
## 3.3 アクチュエータ

### 3.3.1 定在波型超音波アクチュエータ

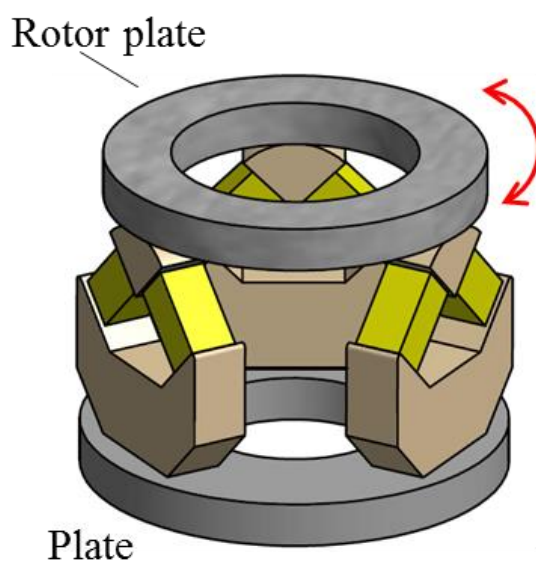
本レーザー加工ヘッドは、ミラーを配置した可動スリーブを回転・直動動作させるため、モータを導入する必要がある。

図 3.6(a)に、レーザー加工ヘッドに導入した定在波型超音波アクチュエータを示す。このアクチュエータは、直角に配置された 2 個の圧電素子、チップ、ベースで構成されており、その大きさは高さ 5.2 mm、幅 5.2 mm、厚さ 1.6 mm である。その駆動は、2 つの圧電素子に位相が異なる正弦波を印加して行うことができるが、本研究では単相駆動法により駆動する<sup>[57]</sup>。すなわち、片方の圧電素子には電圧を印加せず、もう片方の圧電素子だけに正弦波電圧を印加する。このとき、電圧を印加していない圧電素子が、ばねダンパとなりチップ先端部に楕円軌跡を描くことができる。これにより、物体を駆動することができる。

しかし、この構造のままではレーザー加工ヘッド内に中空部を確保することができないため、図 3.6(b)に示すモータユニットを製作した。このユニットは、中空円盤上に超音波アクチュエータを 120°間隔に 3 個配置した構造となっている。また、3 個のアクチュエータのチップ先端にはロータ円盤が接触しており、アクチュエータを駆動することでロータ円盤が回転する。



(a) 超音波アクチュエータ

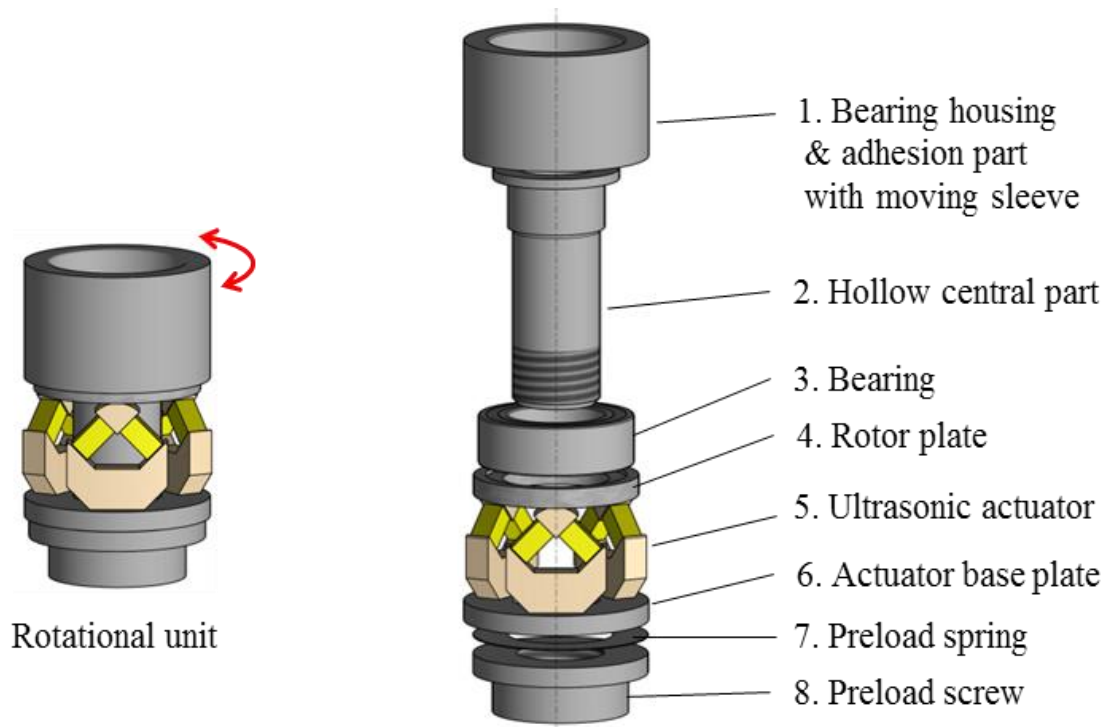


(b) アクチュエータユニット

図 3.6 超音波アクチュエータとユニット

### 3.3.2 回転ユニット

図 3.7 に図 3.6(b)のアクチュエータユニットを用いて構成した回転ユニットの構造を示す。アクチュエータユニットは、番号 7 の与圧ばね（波ワッシャ）と番号 8 の与圧ねじによって、番号 4 のロータ円盤に押しつけられている。超音波アクチュエータに電圧が印加されると、チップ先端部の接触摩擦によりロータ円盤は回転する。ロータ円盤の回転は、番号 3 のベアリングおよび番号 1 のベアリングハウジングに伝達される。なお、番号 3 のベアリングは、番号 2 の中空部品とはめあう。さらに、番号 2 の中空部品は番号 3 から 7 の中空部分を通っており、与圧ネジによって超音波アクチュエータが押し付けられている。番号 1 のベアリングハウジングは可動スリーブと結合されるため、これにより可動スリーブは回転動作を行なうことができる。



Rotational unit

図 3.7 回転ユニットの構造



### 3.3.3 直動ユニット

可動スリーブは要求される仕様から、直動方向へ動作させる必要がある。図 3.8 に直動ユニットの構成を示す。この直動ユニットは、図 3.7 の回転ユニットと同様に図 3.6(b)に示したアクチュエータユニット（番号 2 から 8）と同じ構成として設計されている。番号 11 のリニアガイドは、側面に設けられている溝によって番号 9 の送りねじ（ピッチ：0.5 mm）が回転するのを防ぐ。このため、アクチュエータユニットによる番号 10 のベアリングハウジングの回転運動は、直動運動へ変換される。また番号 9 の送りねじは、回転ユニットと結合される部品であるため、これにより可動スリーブを直動方向へ動作させることができる。

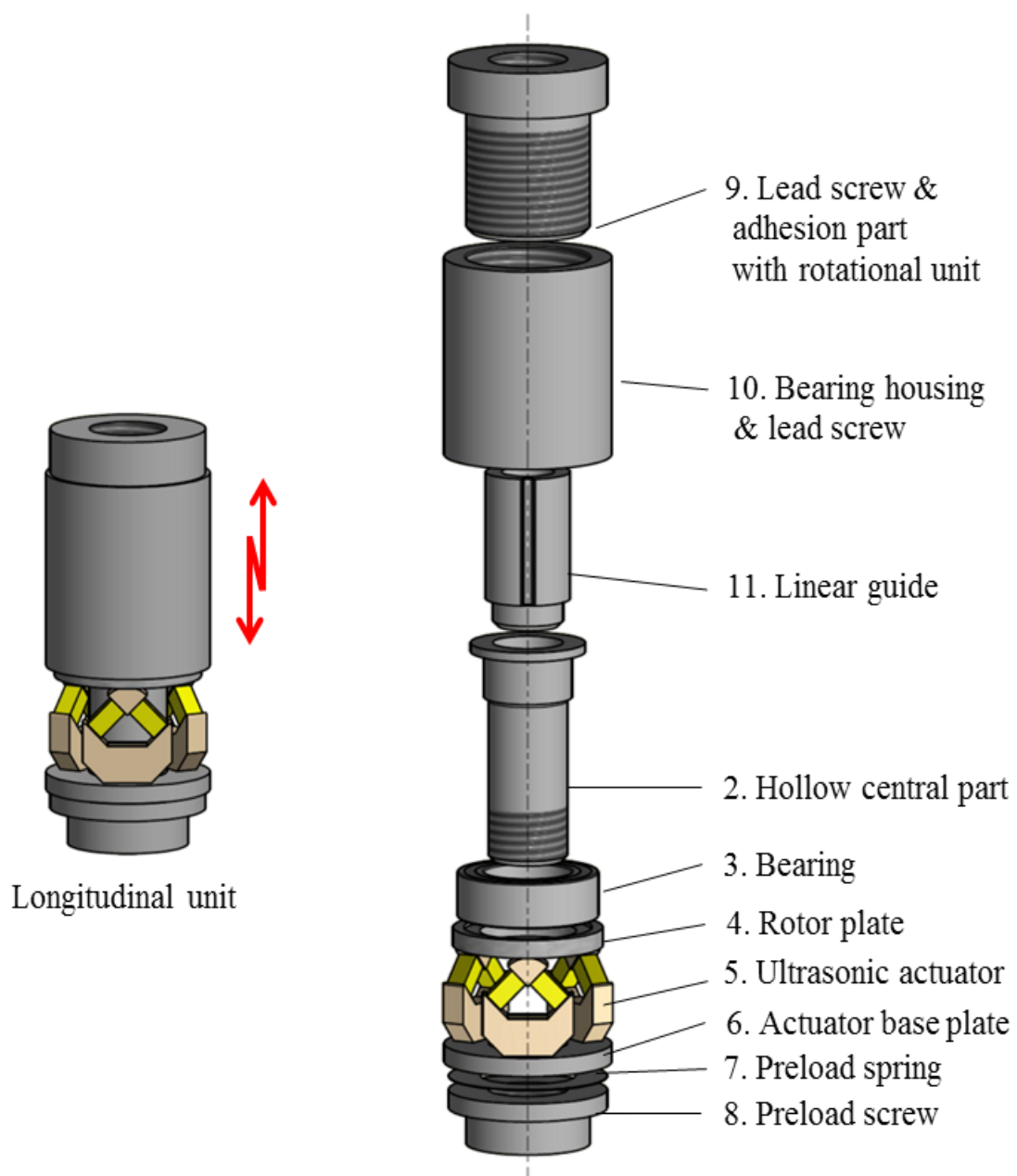


図 3.8 直動ユニットの構造

## 3.4 アクチュエータユニットの回転性能

可動スリーブを用いて配管内を目視で観察するには、図 3.6(b)に示すアクチュエータユニットを低速で駆動する必要がある。しかし、本レーザー加工ヘッドのように、中空部を確保したまま直径 1/2 インチ以内の大きさで回転速度を計るセンサは存在しない。このため、アクチュエータユニットの駆動性能を予め検証し、低速駆動の方法について検討する必要がある。本節では、アクチュエータユニットの回転性能を検証した結果について述べる。

### 3.4.1 駆動回路

図 3.9 に本アクチュエータの駆動回路を示す。この回路はオペアンプによる増幅率 2 倍の非反転増幅回路と、プッシュプル・エミッタ・フォロアの電力増幅回路を組み合わせ構成した。プッシュプル・エミッタ・フォロアとは、2つのトランジスタの不感帯を、トランジスタのベースにダイオードによる 0.6 V のオフセットをかけて取り除き、効率よく電流を取り出すことができる回路構成であり、モータや各種アクチュエータを駆動する回路としてよく用いられる。帰還はオペアンプの出力からではなく、プッシュプル・エミッタ・フォロア回路の出力からかけており、帰還抵抗に 10 pF のセラミックコンデンサを並列に接続している。トランジスタのベース部分のバイアス回路には、電圧が 0.6 V の一般的なシリコンダイオードを用いた。トランジスタは 2SA1020 と 2SC2655 のコンプリメンタルペアのものを使用した。デュアルオペアンプ AD826 によって与えられる電圧は  $\pm 6.5$  V である。また、この電圧はデュアルトラッキング DC 電源装置へ与えられる。一方、AD826 への入力信号は関数発生器によって与えられる。回路からの出力信号は圧電素子に印加され、これによりアクチュエータユニットが駆動する。

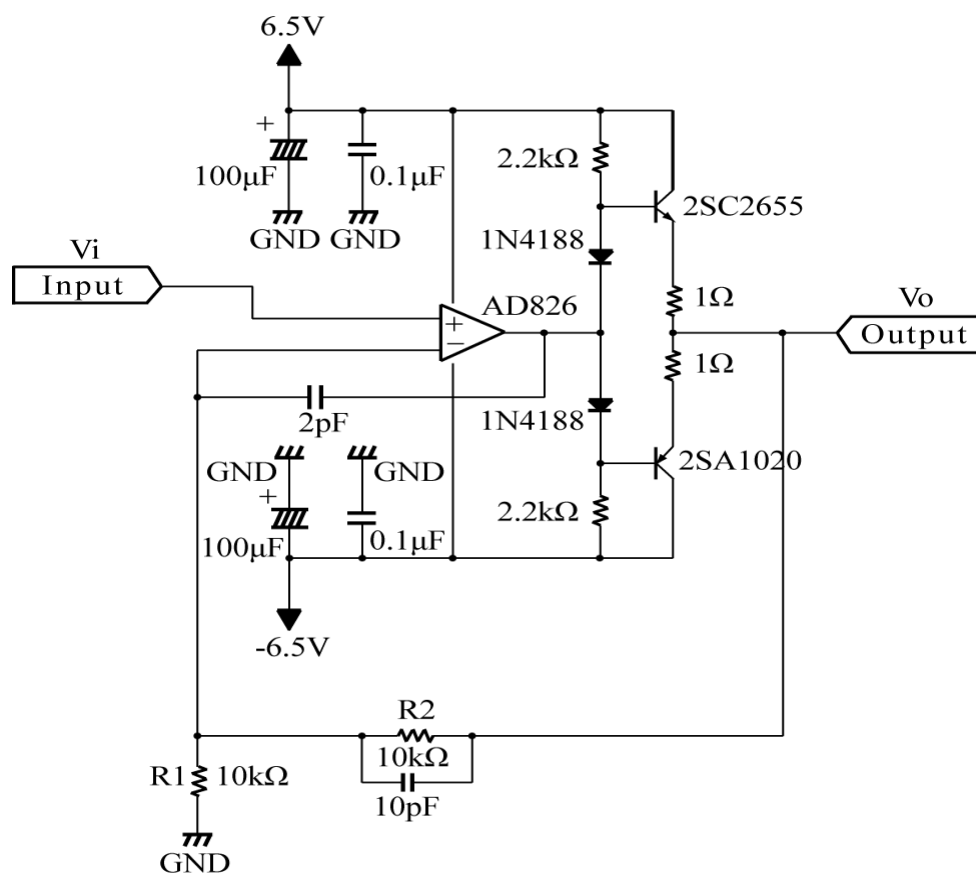


図 3.9 駆動回路

### 3.4.2 回転性能検証装置

図 3.10 に製作したアクチュエータユニットの性能検証装置を示す。本検証装置の番号 2~7 の部品は、図 3.7 の回転ユニット、図 3.8 の直動ユニットと同じ構成とした。回転速度はロータリーエンコーダにより検出し、アクチュエータユニットとエンコーダとのカップリングには番号 12 の円筒により行った。なお、番号 12 の円筒は、レーザー加工ヘッドの動作を想定し、可動スリーブとほぼ同じ直径・質量になるように製作した。

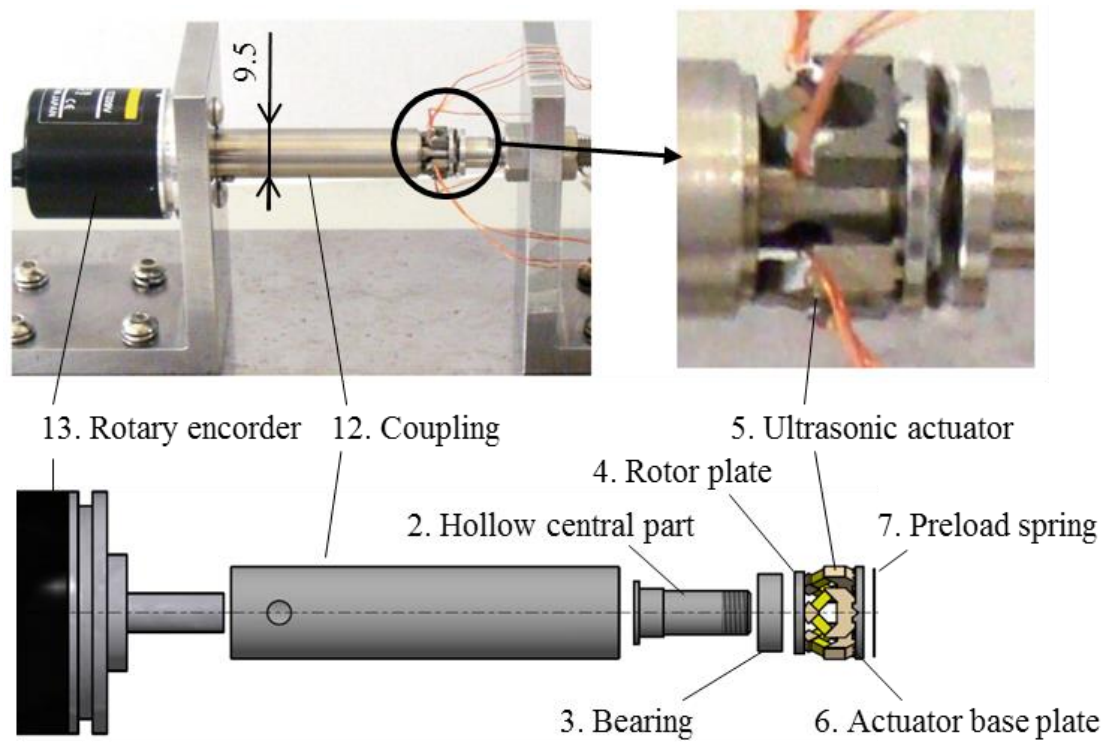


図 3.10 アクチュエータユニットの性能検証装置

### 3.4.3 回転性能検証実験の結果

図 3.11 に回転性能検証装置を用いて行ったアクチュエータユニットの回転速度性能を示す。駆動電圧は 4 V の正弦波とし、駆動周波数は 165 kHz から 5 kHz 刻みでデータを取得した。なお、170 kHz~175 kHz の周波数帯域に最高回転速度を示す傾向が見られたため、この帯域の実験は 1 kHz 刻みで行った。図より、反時計方向駆動では 171 kHz のとき、また時計方向駆動では 174 kHz のとき最高回転速度を示していることがわかり、駆動周波数に若干の差が見られた。この理由としては、カップリング内に組み込まれている番号 3 のベアリング摩擦の影響などが考えられる。

一方、 $1000^{\circ}/s$  の回転速度は、約 167 rpm に相当する回転数である。本アクチュエータユニットは、可動スリーブの動作に用いるため高速に回転させる必要はなく、数 rpm 程度で回転すればよい。このため、本研究では、反時計方向および時計方向駆動で回転速度がほぼ一致している 185 kHz (回転数は約 98 rpm) を駆動周波数とし、3.5.1 節で述べる低速駆動法を導入して可動スリーブを駆動する。

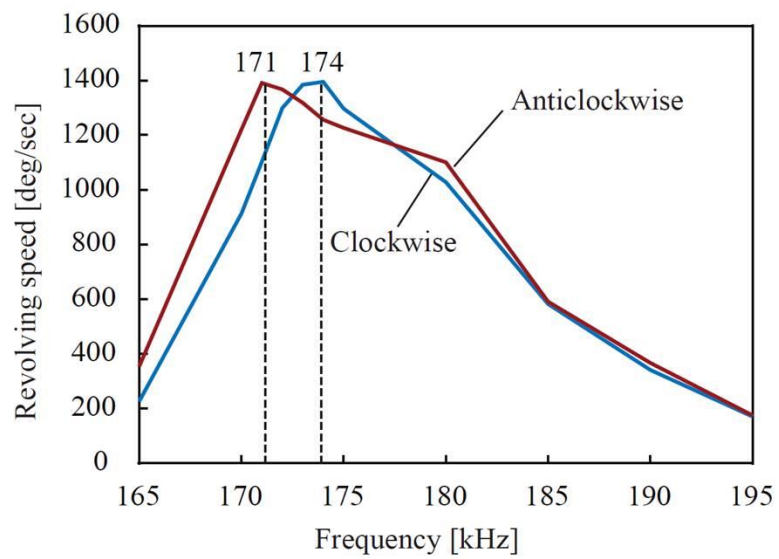


図 3.11 駆動周波数と回転速度の関係



## 3.5 レーザー加工ヘッドの駆動性能

前章では、アクチュエータユニットの性能を検証したため、本章ではレーザー加工ヘッドの動作について検証する。

### 3.5.1 低速駆動法

前章で図 3.6(b)のアクチュエータユニットの回転性能を検証した。その結果、駆動周波数は、反時計方向および時計方向へほぼ同じ速度で動作させることができる 185 kHz（周期では約 5.5  $\mu$ s）に設定することとした。しかし、回転速度が約 98 rpm であったため、本研究では低速駆動法を導入する<sup>[59]</sup>。

図 3.12 に低速駆動法の駆動波形を示す。この方法では、超音波アクチュエータに印加する波形を、バースト波のように、波形を印加する時間  $a$  と印加しない時間  $b$  を設けて駆動するものである。本研究では、PC を用いて波形を制御するため、そのサンプリング周期を  $h=2$  ms とする。時間  $a$  と  $b$  は、このサンプリング周期  $h$  の整数倍とし、可動スリーブの動作速度を見ながら決定した。

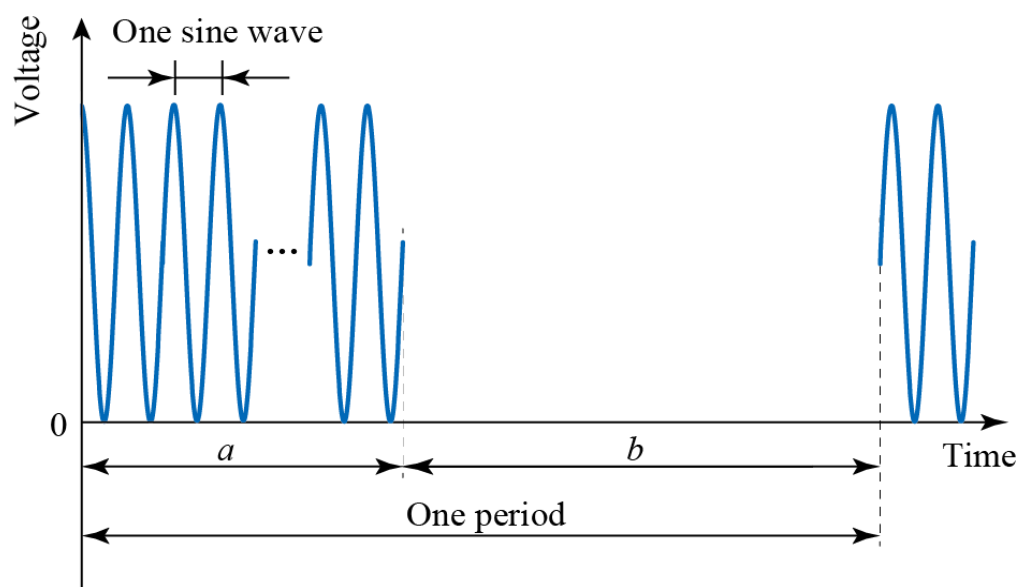


図 3.12 低速駆動法の駆動波形

### 3.5.2 回転動作

図 3.13 に可動スリーブを低速駆動法によって回転させたときの様子を示す。なお、上述した通り、中空部を確保したまま直径 1/2 インチ以内の大きさで回転速度を計るセンサは存在しないため、本研究ではビデオカメラを用いた画像解析により動作速度の検証を行った。なお図 3.12 に示す電圧印加時間  $a$  は 4 ms、オフ時間  $b$  は 26 ms と設定した。図より、駆動時間 0 s 時の初期状態において、可動スリーブの角度を  $0^\circ$  とすると、駆動時間 8 s 後には約  $90^\circ$ 、16 s 後には約  $180^\circ$  の角度に推移したことが確認できた。したがって、可動スリーブは目視で配管内を観察できる約 2 rpm の低速回転駆動を実現できたと考えられる。

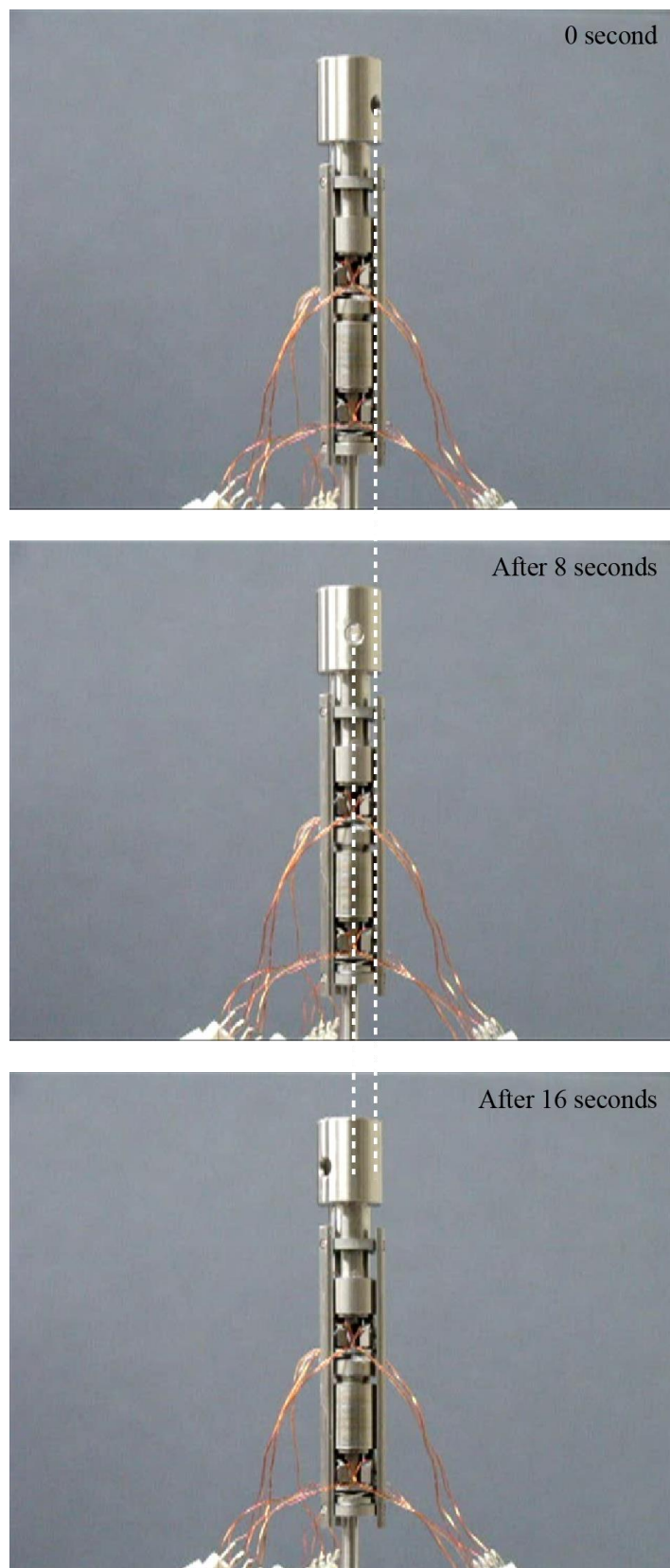


図 3.13 回転駆動の様子 (2 rpm)

### 3.5.3 直動動作

図 3.14 に可動スリーブを低速駆動法によって直動させたときの様子を示す。可動スリーブは目視で配管内を確認できる動作速度にする必要があるため、可動スリーブの動作速度を  $0.1 \text{ m/s}$  に設定した。ここで、送りねじのピッチが  $0.5 \text{ mm}$  であることから、回転数を  $12 \text{ rpm}$  とするため、電圧印加時間  $a$  は  $6 \text{ ms}$ 、オフ時間  $b$  は  $4 \text{ ms}$  とした。図より、駆動時間  $0 \text{ s}$  において、可動スリーブの初期位置を  $0 \text{ mm}$  とすると、駆動時間  $15 \text{ s}$  後には約  $1.5 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ s}$  後には約  $3 \text{ mm}$  の位置に変位していた。したがって、可動スリーブは約  $0.1 \text{ mm/s}$  の低速度で直動方向へ動作したと考えられる。

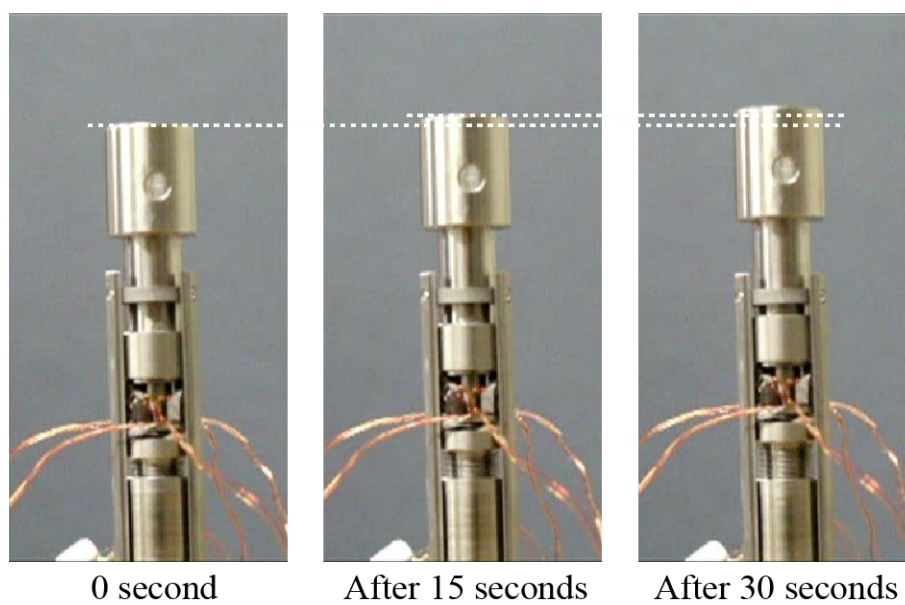


図 3.14 直動駆動の様子 (0.1 mm/s)

### 3.6 本章の結言

本章では、光ファイバ스코ープを使用して、直径 1/2 インチの配管内の検査および補修ができるレーザー加工ヘッドを設計・開発した。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) レーザー加工ヘッドは、その動作環境や要求される仕様に基づいて設計された。その結果、製作した加工ヘッドは、光ファイバ스코ープを通すため直径 3 mm の中空部を確保した上で、外径が 11 mm, 全長が 65 mm, 全質量が 31 g と小型軽量のものを開発することができた。
- 2) 定在波型超音波アクチュエータを用いて、中空部を確保するアクチュエータユニットの構造を示し、その駆動性能を明らかにした。
- 3) アクチュエータユニットを組み込んだ回転ユニットならびに直動ユニットの動作検証を行った結果、目視で確認できるよう低速駆動が可能であることを示した。

以上の結果から、要求仕様を満足した配管検査補修装置を開発することができた。しかしながら、開発した装置に用いた定在波型 USM は、1 軸駆動に 6 個の圧電素子を用いる必要があり、電気配線が多く複雑な構造とり、さらなる小型化を目指す場合には課題となる。

## 第 4 章 板状部材を用いた超音波モータの開発

前章で開発した配管検査補修装置に用いた定在波型 USM は、物体を双方向に駆動するためには 2 個以上の圧電素子が必要であった。さらに、開発した装置は、1 軸駆動に 6 個の圧電素子を用いているため、回転駆動・直動駆動を実現するには合計 12 個の圧電素子を必要とし、電気配線が多く複雑な構造となってしまうことや、さらなる装置の小型化を目指す場合には大きな課題となる。そこで、本章では、これまでになかった 1 つ圧電素子と板状部材を直列配置したシンプルな構造で、物体の双方向駆動を実現する新しい USM を提案し検討した。

### 4.1 緒言

これまで、様々な USM が開発されているが、ほとんどの USM は圧電素子の変位量をそのまま利用しており、USM の性能向上のためには、圧電素子の変位を拡大させる必要がある<sup>[38-40,44-48]</sup>。一方、Dubois らが開発した変位拡大機構を取入れた SIDM 型 USM を図 4.1 に示す<sup>[60]</sup>。図の a の部分が USM である。この菱形形状の変位拡大機構は、圧電素子と比較すると寸法が大きく、さらなる小型化に適した構造であるとは言えない。

そこで、著者らは板状部材と圧電素子を 1 つのみ使用し、双方向駆動が可能な新しい USM を開発した<sup>[32]</sup>。図 4.2 にその特徴を示す。圧電素子の微小な変位量を板状部材により拡大することができる点にあり、その結果、駆動性能の向上が期待できる。しかし、これまで検討していたモータは、板状部材を平面型にしていたため、圧電素子の伸張に対して直交する方向の変位は拡大できたが、伸張方向の変位が縮小する結果となり、回転速度を向上させることができなかった<sup>[33]</sup>。そこで、板状部材を湾曲型にすることにより、圧電素子の伸張方向および直交方向とも変位拡大がなされるため、回転性能の向上とトルク性能の向上が期待でき、両者のトレードオフは、板状部材の形状設計で実現できると考えられる。本章では、変位拡大率を向上するため、湾曲型に曲げ加工した板状部材を導入し、有限要素解析によるシミュレーションと、実機実験によりその効果を確認した。



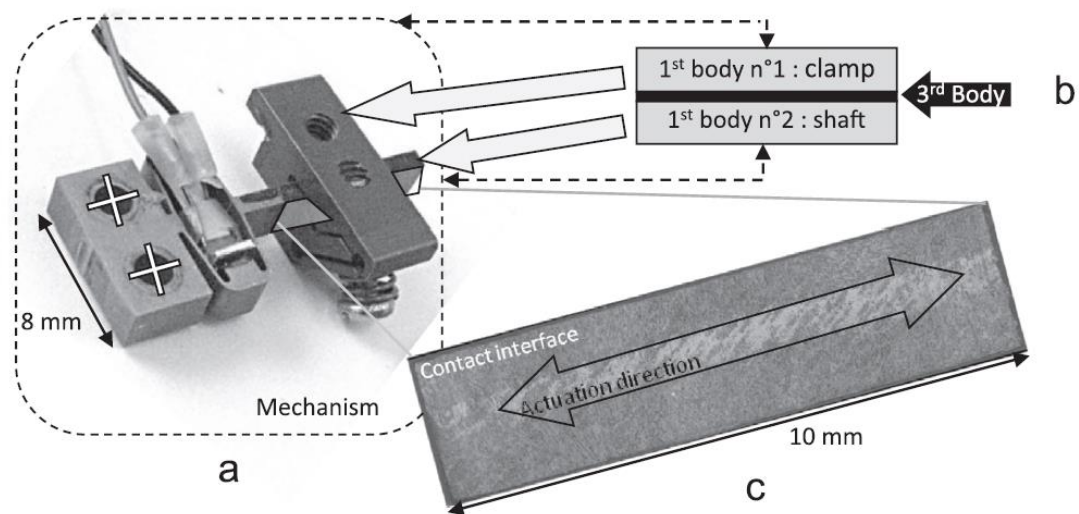


図 4.1 変位拡大型 USM の例<sup>[60]</sup>

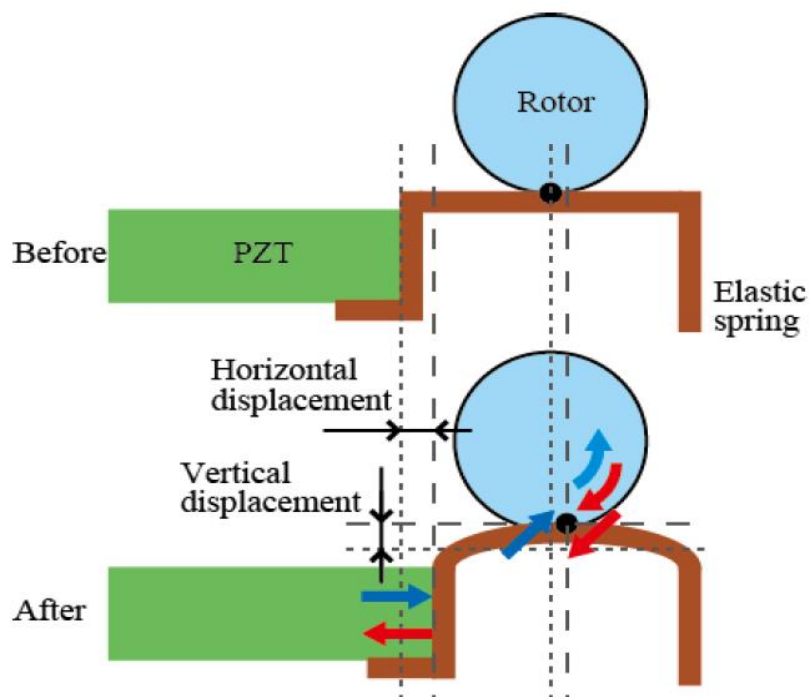


図 4.2 著者らが開発した平型タイプの USM<sup>[32,33]</sup>

## 4.2 超音波モータの構造と駆動原理

図 4.3 に本研究で提案するステータの構造を示す。また、図 4.4 に寸法を示す。その構成は、圧電素子、曲げ加工した湾曲板状部材、L 型支持部品、固定部品からなり、圧電素子と湾曲型板状部材の接合部以外は、固定部品に接着する。圧電素子には AE0203D04 (NEC トーキョー, 最大変位  $4.6 \mu\text{m}/150 \text{ V}$ ) を用い、その大きさは断面積が  $2 \times 3 \text{ mm}$ 、全長は  $5 \text{ mm}$  である。板状部材の材料にはリン青銅を用い、板厚は  $0.2 \text{ mm}$ 、全長は  $4.8 \text{ mm}$  とし、L 型支持部品の板厚を含めた全長は  $10 \text{ mm}$  である。なお、板状部材の長さを長くすることにより拡大率は向上できるが、本研究では同じ長さにした場合の検討を行った。

本 USM の駆動原理は SIDM 型 USM と同様であり、圧電素子に電圧を印加し伸長させると、圧電素子の左側面と板状部材の右側面がベースに固定されているため、板状部材の頂点が盛り上がるように斜め上方向に弾性変形し圧電素子の微小な変位を拡大することができる。このときの変形を利用してロータと接触させることにより、物体を駆動することができる。駆動波形には図 4.5 に示すノコギリ波を用い、圧電素子の伸張・収縮速度の差により駆動する。圧電素子の伸びと縮みの時間に差をつけることにより、摩擦と慣性によって回転駆動を行う。(a)は反時計回転駆動の入力波形、(b)は時計回転駆動の入力波形である。(a)の反時計回転駆動では、圧電素子に印加する電圧の変化が緩やかな領域では、圧電素子はゆっくり伸張し、これに伴い板状部材は緩やかに弾性変形する。このときロータは板状部材との摩擦によって回転する。次に、印加電圧の変化が急な領域では、圧電素子は急速に縮小し、板状部材は急速に弾性変形する。このときロータは慣性により滑り、ほぼその位置にとどまる。これを繰り返し行うことによりロータを回転させることができる。

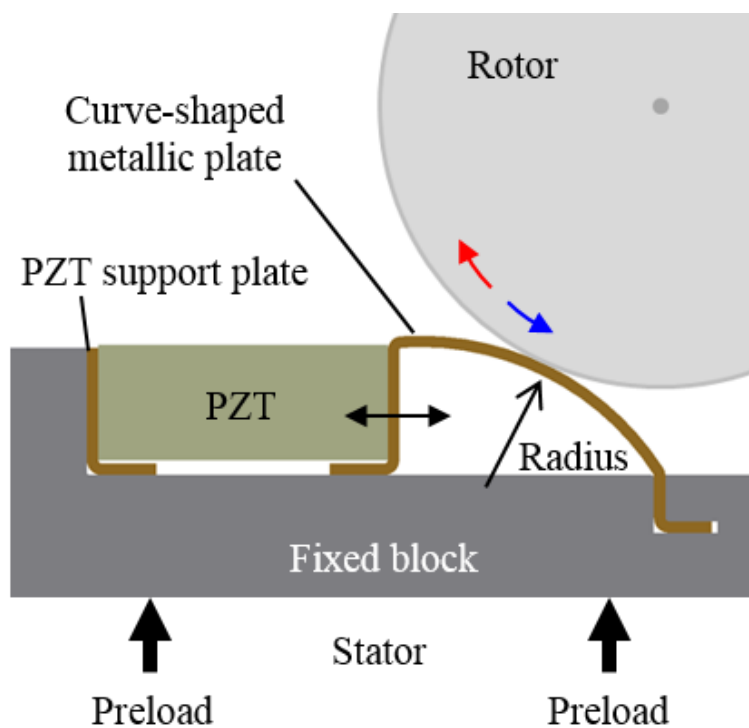


図 4.3 USM の構成

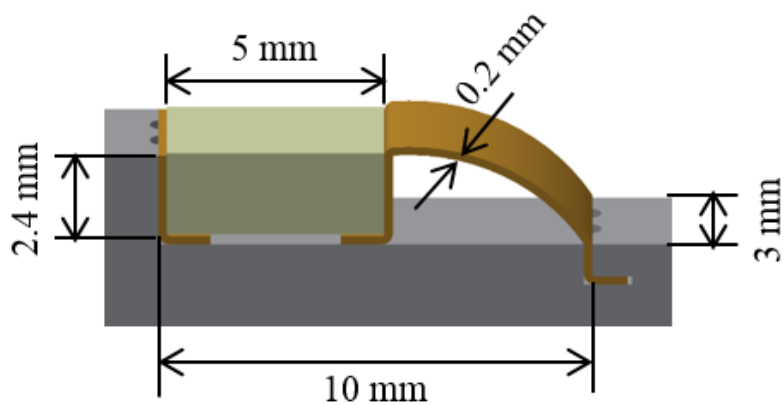
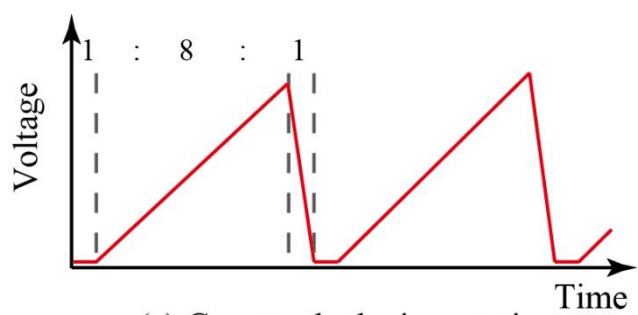
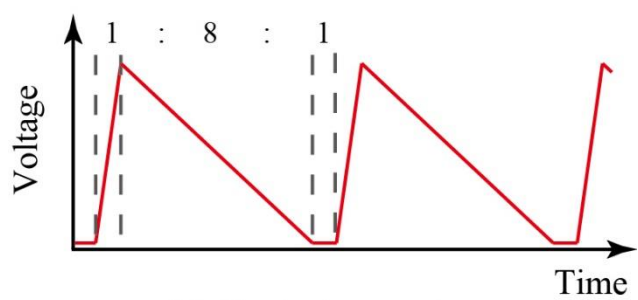


図 4.4 USM の寸法



(a) Counterclockwise rotation



(b) Clockwise rotation

图 4.5 入力信号波形

### 4.3 板状部材の設計

図 4.6 に設計に用いた湾曲板状部材の概略図を示す。その大きさは、板状部材の全長と L 型支持部材の板厚を合わせた長さ、奥行き、高さ（板厚を除く）は圧電素子と同じ寸法とし、湾曲型の曲率半径を 3~20 mm まで間を変化させた。設計には、Autodesk Inventor の有限要素解析機能を用い、曲率半径  $r$  を設計パラメータとして、変位拡大率の検討を行った。

図 4.7 に解析結果を示す。横軸は湾曲形状の曲率半径  $r$ 、縦軸は圧電素子の伸張量に対する板状部材の水平（圧電素子の伸張方向）および直交方向への変形量から求めた拡大率である。なお、解析条件は、ヤング率 110 GPa、ポアソン比 0.33 とした。図より、湾曲板状部材の曲率半径  $r$  が 4 mm では変位拡大率がほぼ 1 倍となり、曲率半径  $r$  が 3 mm では圧電素子の変位量を拡大させることができない結果となった。一方、曲率半径  $r$  が大きくなると水平および直交方向とも拡大率が向上し、曲率半径  $r$  が 18 mm では、水平方向に 1.67 倍、直交方向には 2.35 倍の拡大率が得られた。そこで、本研究では、湾曲板状部材の性能を曲率半径  $r_5$  と曲率半径  $r_{18}$  とで比較した。

有限要素解析結果を図 4.8 と図 4.9 に示す。これより、圧電素子が水平方向に  $3.5 \mu\text{m}$  の変位を与えた場合、曲率半径  $r_5$  と曲率半径  $r_{18}$  の湾曲板状部材の水平方向の最大変位量は曲率半径  $r_5$  では  $4.06 \mu\text{m}$ 、曲率半径  $r_{18}$  では  $5.83 \mu\text{m}$  であり、変位拡大率はそれぞれ 1.16 倍および 1.67 倍となり、平型タイプの板状部材を用いた実験<sup>[33]</sup>と比較すると曲率半径  $r_{18}$  では、変位拡大率が 36%増加し、垂直方向への最大変位量は、それぞれ  $4.33 \mu\text{m}$ 、 $8.21 \mu\text{m}$  であった。

また、製作した曲率半径  $r_5$  と曲率半径  $r_{18}$  の湾曲板状部材を図 4.10 に示す。製作した湾曲板状部材にはリン青銅を用い、曲げ加工によって製作したため、スプリングバックの影響から、図のように加工誤差が生じていることが確認できる。

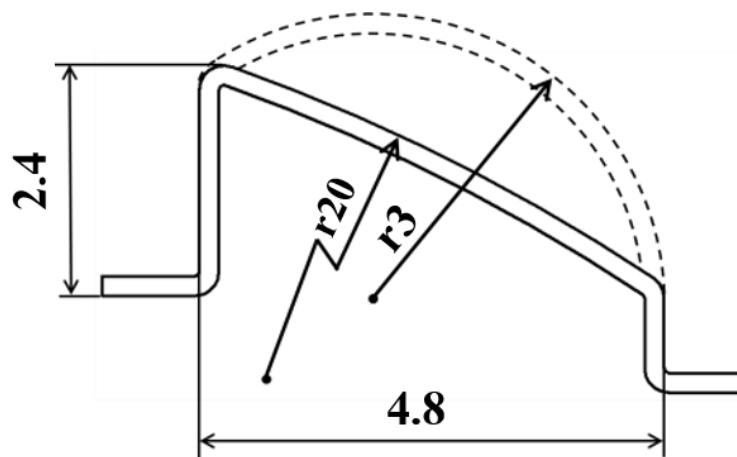


図 4.6 湾曲板状部材の曲率半径による形状の違い (3 mm, 20 mm)

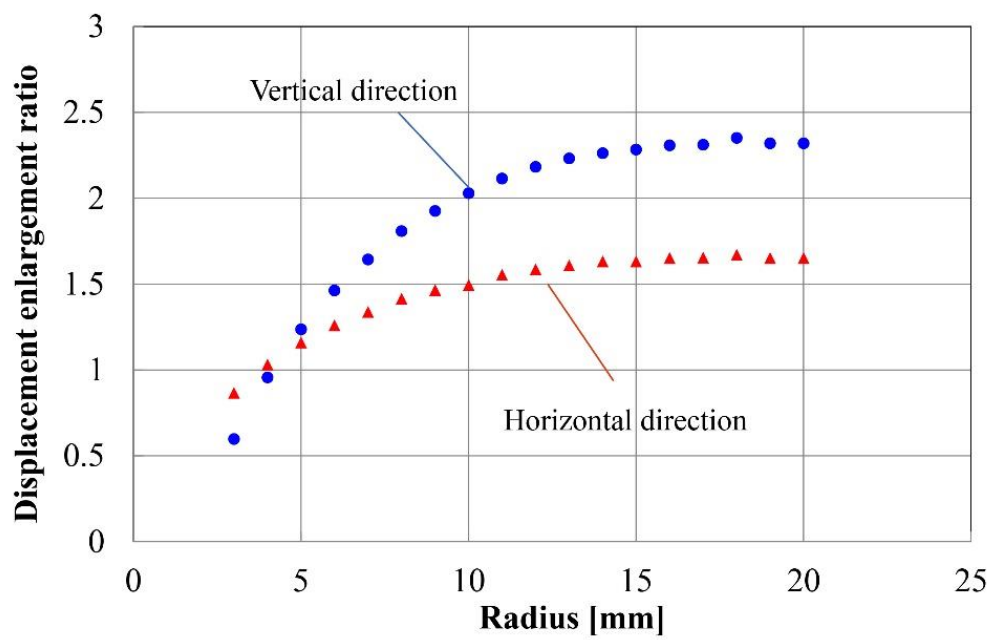


図 4.7 湾曲板状部材の曲率半径と変位拡大率の関係

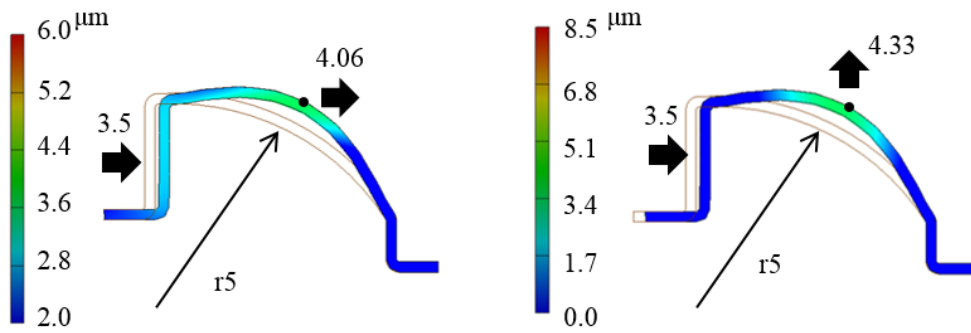


図 4.8 有限要素解析の結果 (曲率半径 r5 タイプ)

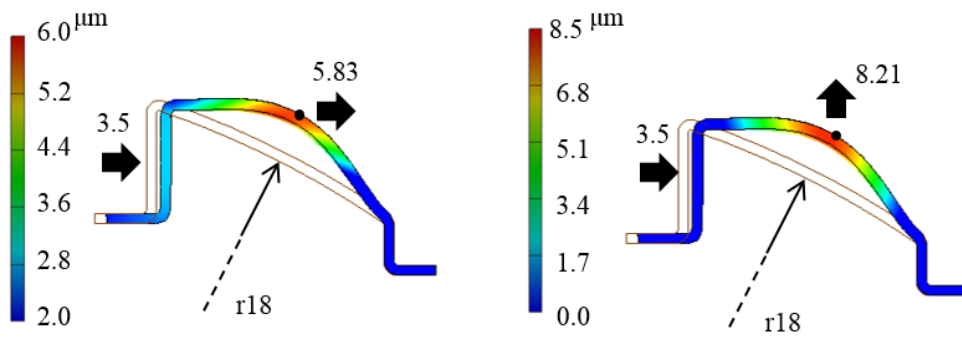
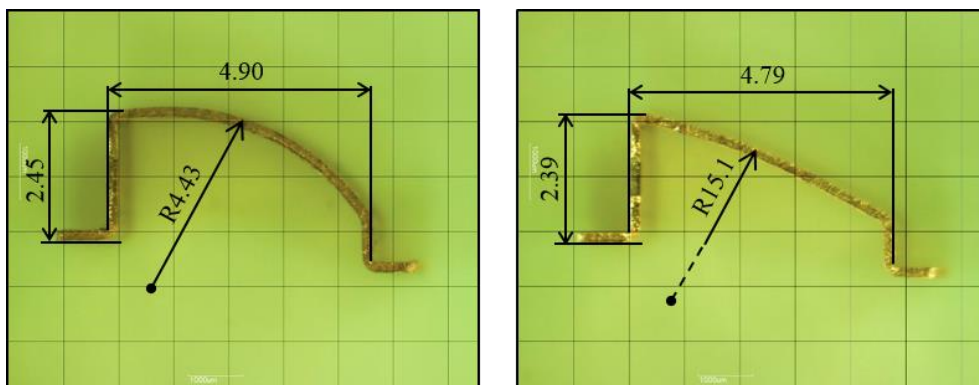


図 4.9 有限要素解析の結果 (曲率半径 r18 タイプ)



(a) 曲率半径 r5 タイプ

(b) 曲率半径 r18 タイプ

図 4.10 製作した湾曲板状部材の写真

## 4.4 駆動実験

図 4.11 に曲率半径  $r_5$  の板状部材を用いた実験装置を示す。ロータには直径 30 mm のアクリルを使用した。ステータは XY ステージに取り付けられ、予圧はコイルばねによって負荷される。ステータの位置を調整しながら回転駆動を検証する。また、図 4.12 に駆動実験の装置構成を示す。駆動用の信号波形を関数発生器 (NF 回路設計ブロック, DF1906) から出力し、アンプ (NF 回路設計ブロック, HSA4052) によって電圧を増幅させ、ステータの圧電素子へ印加し駆動実験を行った。実験条件が、予圧 11 N、駆動周波数が 12.9 kHz のときの曲率半径  $r_5$  タイプの印加電圧に対する回転速度の実験結果を図 4.13 に示す。図より、駆動電圧が 140 V で、反時計回転方向の最大回転速度は 16.5 rpm であった。また、時計回転方向の最大回転速度は 13.1 rpm であった。さらに、図 4.14 に予圧に対する回転トルクを示す。これより、予圧が大きいほど大きなトルクが得られる結果となった。



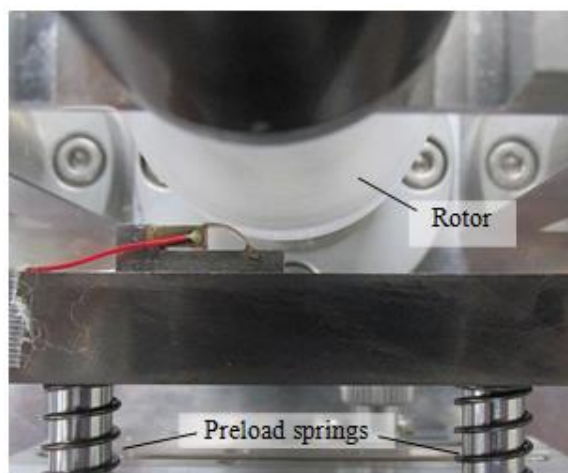


図 4.11 回転駆動実験装置 (曲率半径 r5 タイプ)

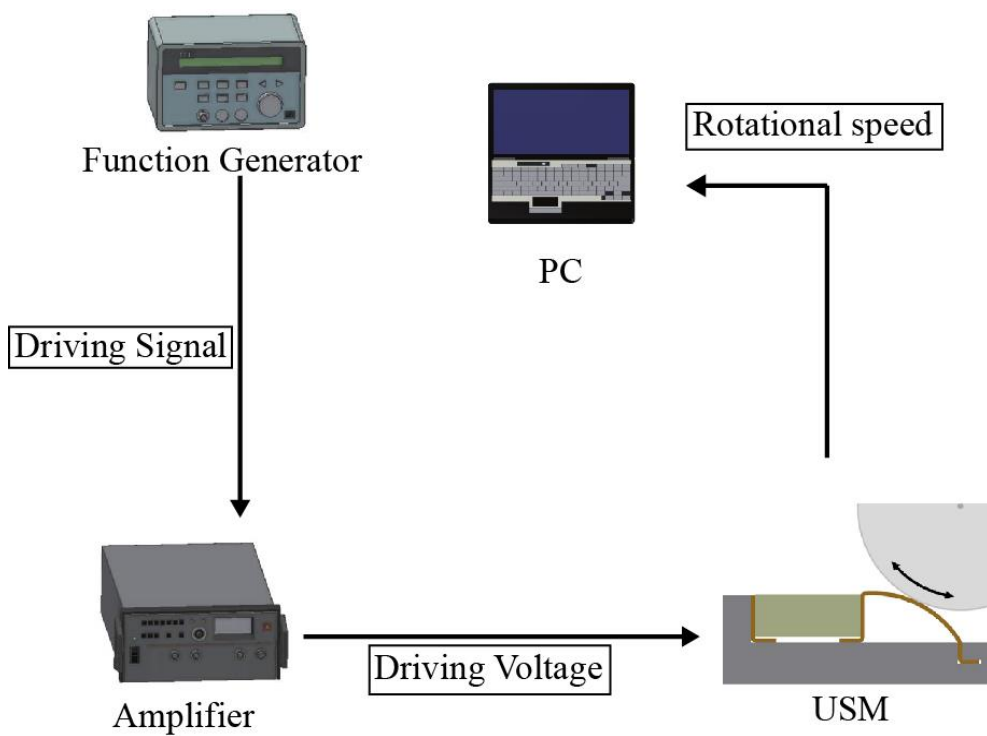


図 4.12 駆動実験の装置構成

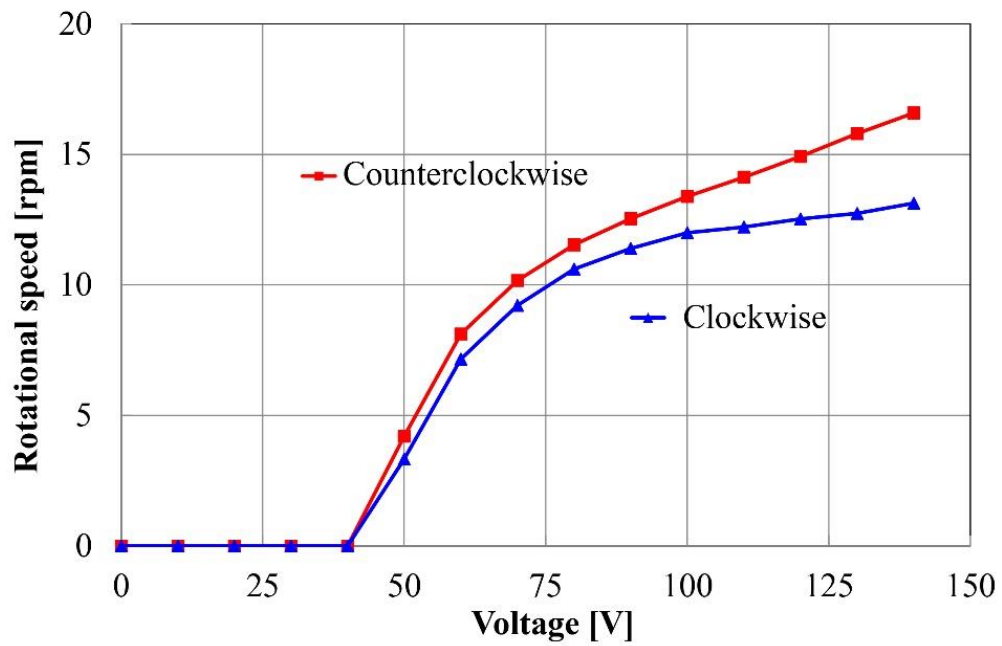


図 4.13 駆動電圧と回転速度の関係 (曲率半径 r5 タイプ)

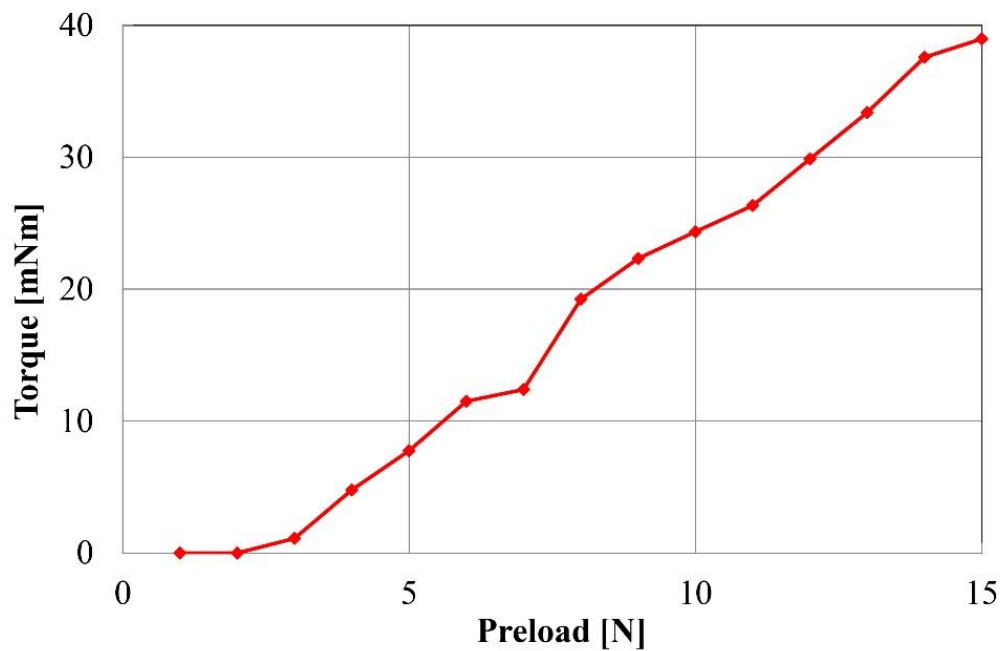


図 4.14 予圧と回転トルクの関係(曲率半径 r5 タイプ)

## 4.5 性能比較

本章で開発した USM と、参考文献の代表的な USM の性能を表 4.1 に示す。ここで、 $V$  : ステータの体積,  $E$  : 駆動電圧,  $u$  : 回転速度,  $Tr$  : 回転トルク,  $Hz$  : 駆動周波数, 使用する圧電素子の数を示している。各 USM は、ステータのサイズや駆動電圧、駆動周波数が様々であり、また、使用する圧電素子の数も異なることから、単純に回転速度や回転トルクの値のみでは、USM の性能を比較することが困難である。そこで、表 4.2 に USM のサイズや駆動電圧等も含めた一覧を示す。ここで、 $u/E$  : 駆動電圧に対する速度,  $u/V$  : 体積に対する速度,  $u/Hz$  : 駆動周波数に対する速度,  $Tr/E$  : 駆動電圧に対するトルク,  $Tr/V$  : 体積に対するトルク,  $Tr/Hz$  : 駆動周波数に対するトルクである。なお、ロータのサイズが明記されている文献については、回転数から速度に変換して表示している。表 4.1, 表 4.2 より、本章の USM は、他の文献の USM よりも小型であり、駆動周波数が低くことがわかる。また、本章の USM は圧電素子の数が 1 つのみであるが、駆動電圧や駆動周波数、ステータサイズに対して他の文献よりもトルクが高いことが確認できる。

表 4.1 参考文献 USM の性能一覧

	V [mm <sup>3</sup> ]	E [V <sub>PP</sub> ]	u [mm/s], [rpm]	Tr [mNm]	Hz [*10 <sup>3</sup> ]	Number of PZT
Dabbagh et al.[45]	16000	80	58.7 mm/s	0.28	20.5	4
Leroy et al.[46]	72	50	353.4 mm/s	4	103	4
Ma et al [48]	160	60 80	300 rpm (60 V <sub>PP</sub> )	1.22 (80 V <sub>PP</sub> )	35.3	2
Park et al [61]	253	50	1000 rpm	0.37	46	4
<b>第 4 章の USM</b>	<b>72</b>	<b>140</b>	<b>25.9 mm/s</b>	<b>40</b>	<b>12.9</b>	<b>1</b>

V :ステータ体積 [mm<sup>3</sup>], E :駆動電圧 [V], u :速度 [mm/s], Tr :トルク [mNm],  
Hz :駆動周波数 [Hz], Number of PZT :圧電素子の数

表 4.2 参考文献 USM の性能比較

	u/E [*10 <sup>-3</sup> ]	u/V [*10 <sup>-3</sup> ]	u/Hz [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/E [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/V [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/Hz [*10 <sup>-3</sup> ]
Dabbagh et al.[45]	734	4	2.86	3.5	0.018	0.014
Leroy et al.[46]	7068	4888	3.43	80	55.6	0.039
Ma et al [48]	-	-	-	15.3 (80 V <sub>PP</sub> )	7.63	0.035
Park et al [61]	-	-	-	7.4	1.46	8.04*10 <sup>-3</sup>
<b>第 4 章の USM</b>	<b>185</b>	<b>361</b>	<b>2.01</b>	<b>286</b>	<b>556</b>	<b>3.1</b>

u/E :駆動電圧に対する速度, u/V :体積に対する速度,  
u/Hz :駆動周波数に対する速度, Tr/E :駆動電圧に対するトルク,  
Tr/V :体積に対するトルク, Tr/Hz :駆動周波数に対するトルク

## 4.6 本章の結言

本章では、1つの圧電素子と湾曲板状部材を用いて、圧電素子の変位量を拡大する新しい構造のUSMを提案した。この構造は圧電素子と湾曲板状部材を直列に配置したシンプルな構造であり、有限要素解析では、これまでの平型板状部材と比較して変位拡大率を向上することを確認した。

さらに実機実験では、双方向駆動を確認し、最大回転速度が $16.5\text{ rpm}$ 、予圧 $15\text{ N}$ における最大トルクが $39\text{ mNm}$ の性能を有する結果となった。

一方、本章で開発したUSMは、他の参考文献と比較して小型ながら高いトルクを出力することができるが、様々な機器に実装することを想定した場合、USMを駆動する際の印加電圧やUSMのサイズが課題となると考えられ、さらなる小型化が必要となる。

## 第 5 章 板状部材を用いたミニチュア超音波モータの開発

前章で開発した USM を様々な小型電子機器等に実装することを想定した場合、USM の大きさが課題となってしまう。そこで本章では、前章で開発した USM で使用した圧電素子を、さらに小さな圧電素子に置き換えることで、小型化が可能となり、駆動電圧も低く抑えることができる、さらに曲げ加工した板状部材と圧電素子を組み合わせたミニチュア USM の開発を検討する。

### 5.1 緒言

近年、産業・医療の各分野において、装置の小型化や高精度化などの要求から、様々なアクチュエータが開発されている。例えば、Gorissen らは、低侵襲手術のために、空気圧を利用したバルーンを用いた小型のマイクロアクチュエータを開発している<sup>[9]</sup>。また、電磁アクチュエータでは、Tsai らは、直径約 2 mm、長さ約 6 mm の小型モータを用いた光干渉断層撮影 (OCT: Optical coherence tomography) による血管内をイメージングする内視鏡を開発した<sup>[10]</sup>。さらに、Wang らは直径約 1 mm、長さ約 2 mm のマイクロモータを用いた血管内をイメージングするための内視鏡を開発した<sup>[62]</sup>。また、Ueno らは鉄-ガリウム合金を用いた 4 つのロッドと球形ロータを組み合わせた、外径 7 mm、長さ 22 mm、角速度  $35^\circ / \text{s}$ 、トルク 0.2 mNm の小型の球形モータを開発し、医療用鉗子のマニピュレータへの有効性を示した<sup>[63]</sup>。しかしながら、このような電磁型アクチュエータは部品点数が多く、さらなる小型化には適さない。

一方、圧電素子を利用した小型のアクチュエータの研究が行われている。例えば、Iino らは直径 4.5 mm、高さ 2.5 mm の超音波モータを開発し、2000 rpm、0.02 Nmm の性能を得ており、腕時計へ実装している<sup>[20]</sup>。また、小型の USM の代表的なものとして、図 5.1 に Mashimo が開発した USM を示す。Mashimo は 4 つの圧電素子を貼り付けた 1 mm 立方メートルのアクチュエータを開発し、2800 rpm、0.013 uNm の性能を得ている<sup>[64]</sup>。この他にも、圧電フィルムやバルク圧電素子を使用した非常に小型の円筒型 USM も開発されている<sup>[65,66]</sup>。しかし、USM は多くの場合、物体を双方向に駆動するためには、圧電素子を複数個配置しなければならないものも多い。さらに、USM は予圧調製機構を必要とすることから、その結果、モータが大きくなり、限られた空間に配置できないことや、駆動電圧が比較的大きいなどの問題がある。

そこで、本章では、これらの問題を解決するため、ステータサイズが約 1.2 mm

×2.2 mm×2.67 mm で、狭小空間内に設置することが可能な小型の USM を開発した。ロータには直径 3 mm のミニチュアベアリングを使用した。本モータは断面 1.2 mm×1.2 mm、長さ 2.47 mm の圧電素子を 1 つのみ使用し、金属の板状部材を折り曲げ、圧電素子に接着したシンプルな構造のステータである。この特徴はステータの全長が圧電素子の長さに板状部材の板厚を加えた大きさであり、さらに、この板状部材が予圧調整を可能とする点である。

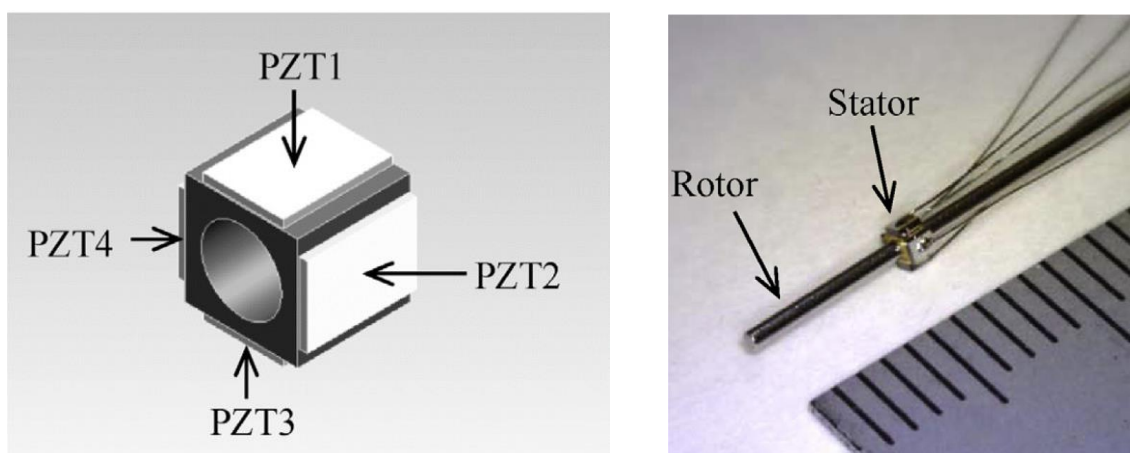


図 5.1 Mashimo が開発した  $1 \text{ mm}^3$  の USM<sup>[64]</sup>



## 5.2 駆動原理

図 5.2 に開発したミニチュア USM の駆動原理を示す。本 USM は圧電素子とアーチ型に加工した板状部材、固定部から構成され、板状部材を物体に押し付け、駆動させることができる SIDM 型である。前章と同様に、本 USM は駆動電圧波形としてノコギリ波形を用い、圧電素子の伸び(a)と縮み(b)の時間に差をつけることにより、摩擦と慣性によって双方向に回転駆動を行う。

図 5.3 に本実験で用いるノコギリ波形を示す。この波形は上図が反時計回りの駆動波形、下図が時計回りとなる駆動波形である。本駆動波形では、電圧の昇圧時間と降圧時間の比率を変化させることにより物体の駆動を行う。反時計回りの駆動波形においては、昇圧時の緩やかな変形で摩擦駆動により物体を移動させ、その後、降圧時の急速な変形によって慣性が生じることにより、物体をその場にとどめる。この波形を連続的に繰り返すことにより、物体を反時計回り方向へ駆動させることができる。また、時計回りの駆動波形では、反時計回りの駆動と同様に電圧の昇圧部分、降圧部分の比率を変化させることにより、物体を時計回り方向へ駆動させることができる。

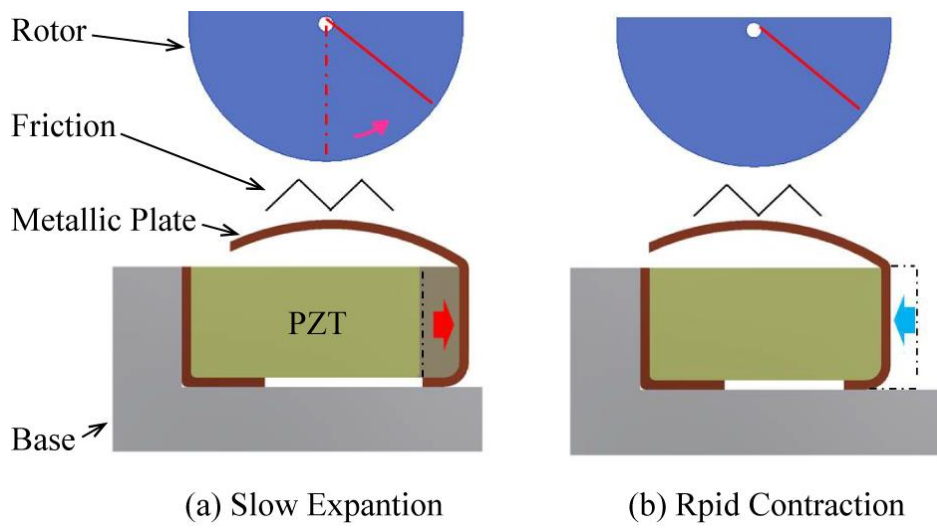


図 5.2 駆動原理

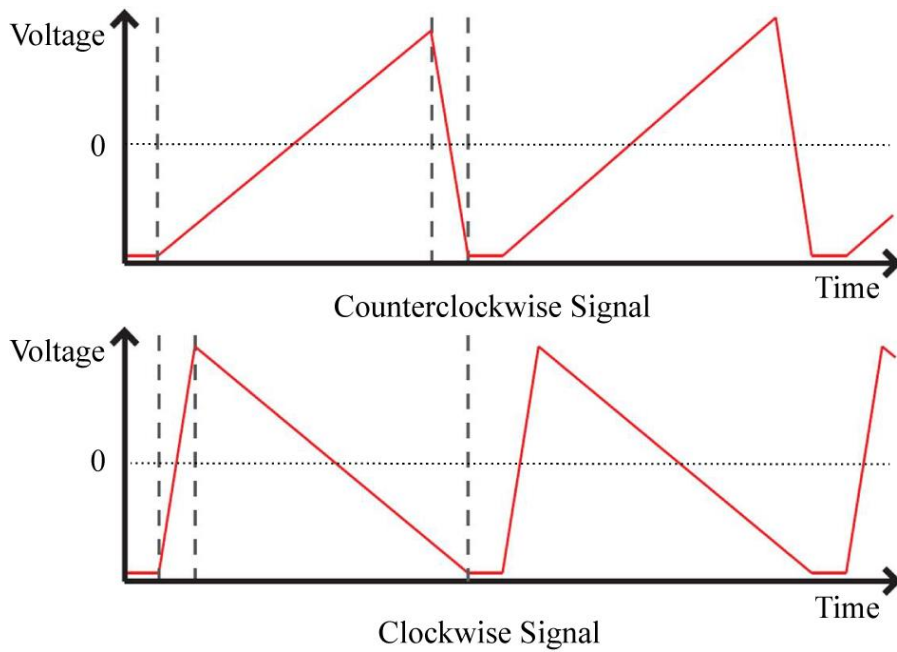
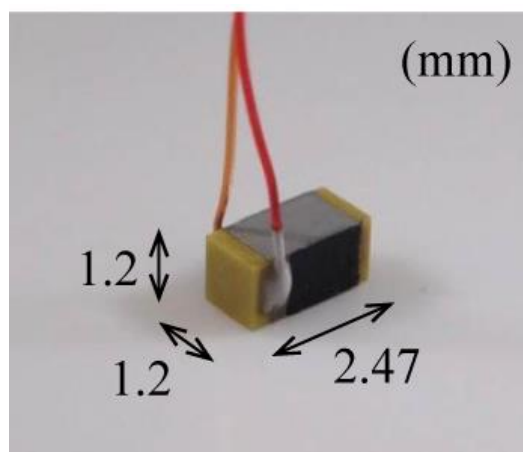


図 5.3 駆動信号

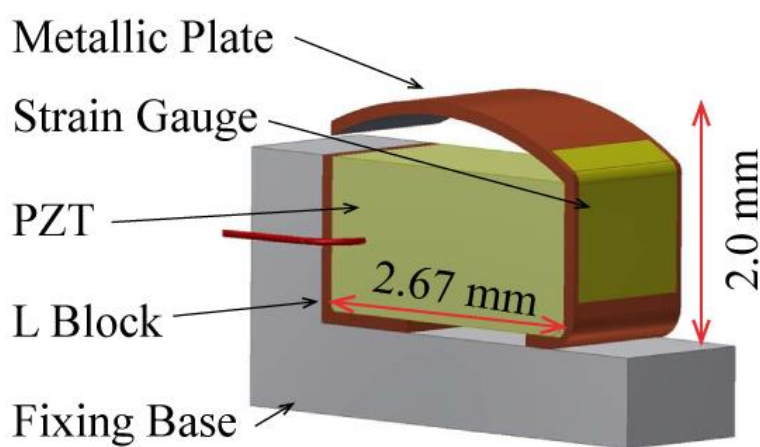
## 5.3 ステータ設計

### 5.3.1 ステータの構造

図 5.4(a)に本実験で使用する圧電素子を示す。圧電素子（NEC/TOKIN, AM1.2x1.2x2.47D-2DF）の大きさは  $1.2 \times 1.2 \times 2.47$  mm である。また、図 5.4(b)にステータの構造を示す。本ステータは、圧電素子を支持する L 型支持部材と圧電素子、移動体に押し付けるアーチ型の板状部材、ステータ固定部から構成させる。使用する各部材はリン青銅製で板厚 0.1 mm とし、L 型支持部材、圧電素子、アーチ型の板状部材を直列に配置した。各接触面を接着し、さらに L 型支持部材はステータ固定部とも接着固定し、板厚を含めた全長は約 2.67 mm である。なお、アーチ型の板状部材とステータ固定部は接着されていない。また、予圧はアーチ型の板状部材の圧電素子の伸長方向外側に超小型ひずみゲージ（東京測器研究所, EFLK-02-11-1LJBT）を貼り付けることにより計測した。



(a)PZT



(b)Stator used in this study

図 5.4 ステータの構造

### 5.3.2 モード解析

ここでは Marc Mentat を用いて有限要素解析を行う。表 5.1 に解析を行う際に使用するステータの材料特性を、図 5.5 に境界条件の位置を示す。ステータ固定部の変位を固定し、このステータ固定部と L 型支持部材、L 型支持部材と圧電素子、圧電素子とアーチ型の板状部材は接着拘束とした。さらに、ステータ固定部とアーチ型の板状部材は接触拘束の条件とした。この結果を図 5.6 に示す。これより、(a)12.0 kHz では上下方向への振動のモードとなり、板状部材の自由端側の変位量が大きく変化している。さらに、(d)63.1 kHz では板状部材中央部に腹を 1 つ持つ振動モード、(e)145.2 kHz では腹を 2 つ持つ振動モードが確認できる。また、(b)38.1 kHz, (c)82.2.0 kHz では、板状部材の自由端側の変位が大きく、加えてねじりのモードが見られる。解析結果より、ロータを駆動するためには、板状部材のねじりが少なく、上下方向の変位が大きい(a), (d), (f)のモードが適していると考えられる。

表 5.1 材料特性

	Fixing Base	L Block, Metallic Plate	PZT
Materials	Duralumin (A2017)	Phosphor bronze (C5212P)	AM1.2* 1.2*2.47 D-2F
Young's modulus[GPa]	69	110	62
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2.8	8.8	14.0
Poisson's ratio	0.34	0.38	0.39
Dielectric constant	-	-	2736
Piezoelectric d33 constant [m/V]	-	-	3.9e-10

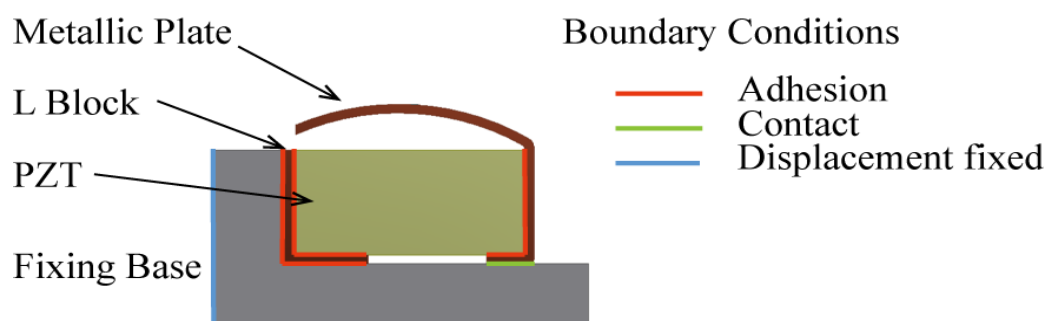


図 5.5 解析時の境界条件

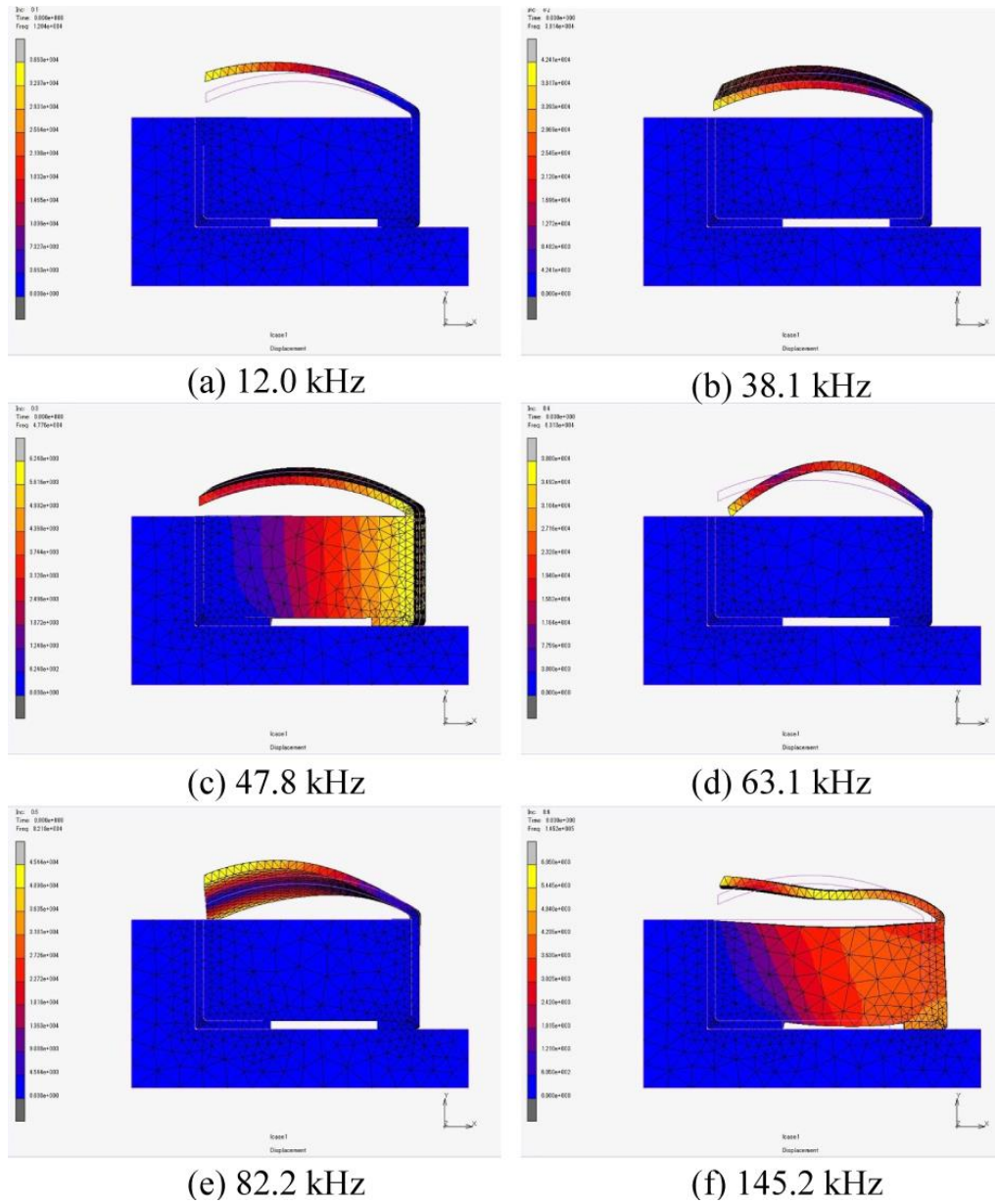


図 5.6 固有振動モードの解析結果

## 5.4 ステータの基礎特性

本ステータの基礎特性として、周波数特性と変位特性を測定した。図 5.7 に周波数特性計測の実験装置構成を示す。周波数特性の計測では、周波数特性分析器 (NF 回路設計ブロック, FRA5087) と光ファイバセンサ (UNIPULSE, ATOPS-A20) を用いた。周波数分析器から Sweep Sin 波信号をアンプ (NF 回路設計ブロック, HSA4052) に入力し、増幅された駆動信号はステータの圧電素子に入力される。さらに、ステータの板状部材の変位信号を光ファイバセンサで計測した信号を周波数分析器へ入力することにより周波数応答を計測した。図 5.8 に、アーチ型の板状部材の圧電素子の伸長方向と、板状部材とロータが接触する位置の湾曲部頂点における垂直方向に光ファイバセンサを当て、周波数分析器からの応答を測定したゲイン線図を示す。これより板状部材の圧電素子の伸長方向の共振点が 19.3 kHz, 47.6 kHz, 105 kHz, 236 kHz 付近にあることが確認できる。また、垂直方向の共振点は 8.9 kHz, 47.6 kHz, 89.5 kHz 付近にあり、計測方向によって異なる結果となった。さらに、実験結果と 5.3.2 で述べたシミュレーション結果と比較すると、(c)47.8 kHz, (e)82.2 kHz では良い一致がみられたが、その他の振動モードでは共振周波数が異なる結果となった。これは、実際のステータの加工誤差や、板状部材に貼り付けたひずみゲージ、これに接続されるリード線などが影響したものと考えられる。

次に図 5.9 にステータの変位特性を示す。圧電素子に関数発生器から台形波信号電圧を印加し、周波数特性の計測と同様の光ファイバセンサにより測定した。これよりステータの伸長方向変位が  $\pm 4$  V では  $0.28 \mu\text{m}$  であった。ここで、本圧電素子の仕様では  $\pm 3$  V で  $0.14 \mu\text{m} \pm 12\%$  の変位量となっており、実験では  $\pm 3$  V で  $0.22 \mu\text{m}$  であった。



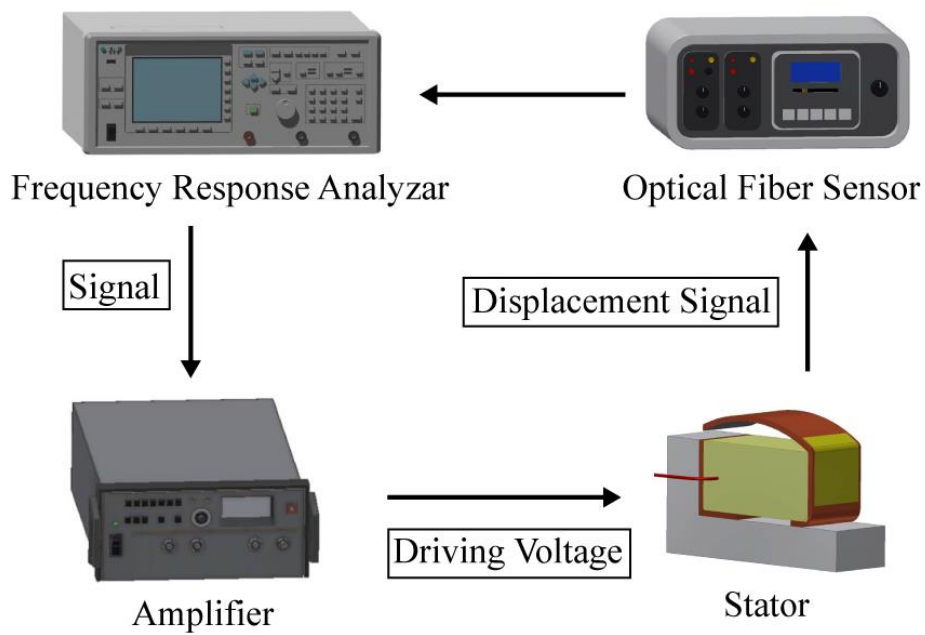


図 5.7 周波数特性計測の実験装置構成

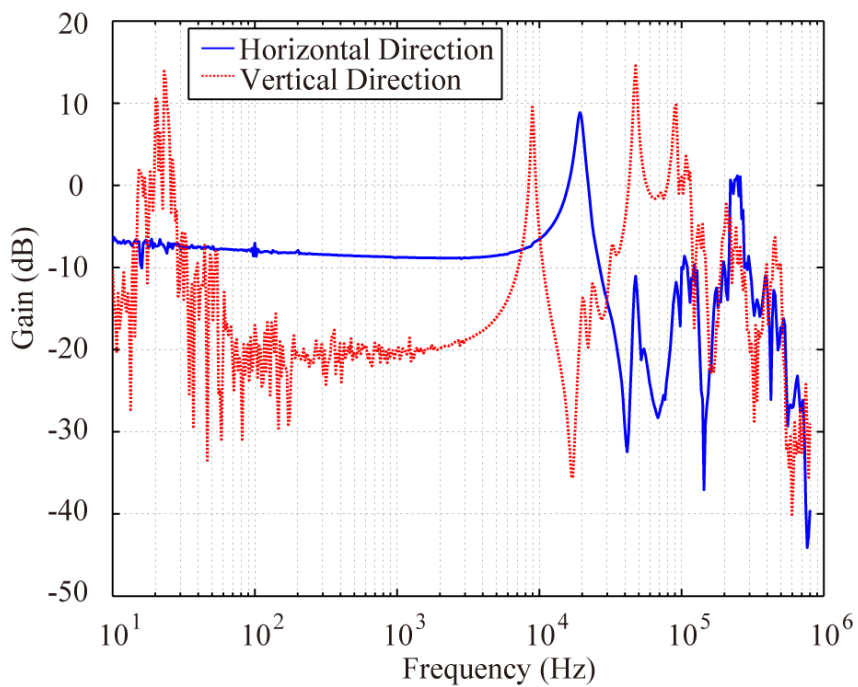


図 5.8 ステータの周波数特性

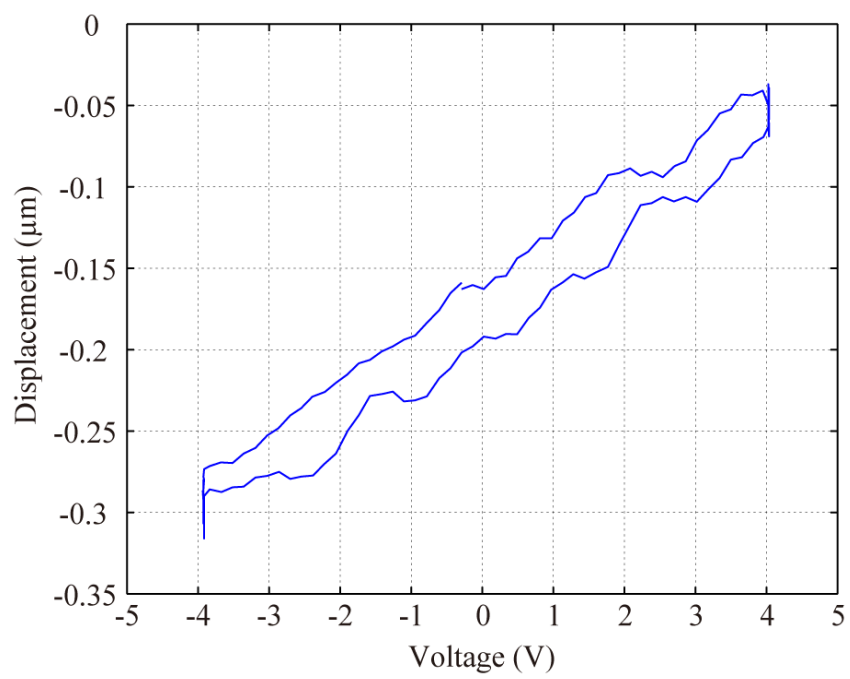


図 5.9 ステータの変位特性

## 5.5 駆動実験

### 5.5.1 実験概要

図 5.10 に製作した実験装置の写真を、また図 5.11 に駆動実験装置の構成を示す。本装置は、ステージ部、ステージに取付けられた移動体を駆動するステータ部、移動体となるロータ部から構成される。予圧はステージをロータ部へ変位させることにより、板状部材で負荷する構造となっている。また、ロータはステンレス製 (SUS440C) で、 $\phi 3$  mm のミニチュアベアリングを使用した。駆動用の信号波形を関数発生器 (NF 回路設計ブロック, DF1906) から出力し、アンプ (NF 回路設計ブロック, HSA4052) によって電圧を増幅させ、ステータの圧電素子へ印加し駆動実験を行う。実験条件は、印可電圧 $\pm 2$  V,  $\pm 3$  V,  $\pm 4$  V, 駆動周波数 14.7 kHz, 47 kHz, 87.6 kHz とした。なお、事前実験にてロータを駆動することが可能な周波数であることを確認し、本周波数を使用した。

予圧は、板状部材に貼り付けたひずみゲージの出力電圧を、データロガー (KEYENCE, NR-500) を用いて計測した。ここで、予圧を計測するため、ひずみゲージを貼り付けたアーチ型の板状部材に小型高感度力センサ (KISTLER, 9215) を押し込み、ひずみゲージの出力電圧と力の関係を求めた。なお、ロータの回転数はビデオカメラの撮影によって計測した。さらに、図 5.12 に示すように、糸をベアリングに取り付け、リング型のロードセルを用いることで回転トルクを計測した。

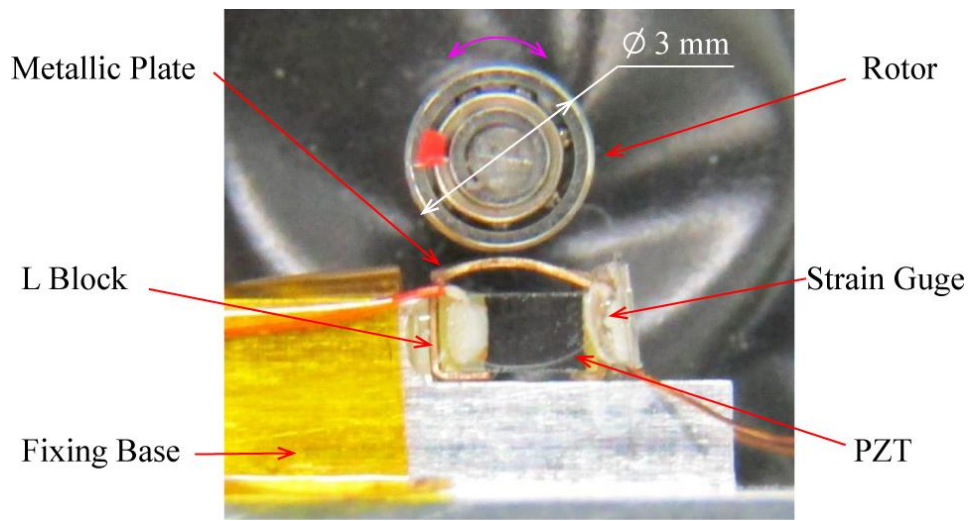


図 5.10 実験装置

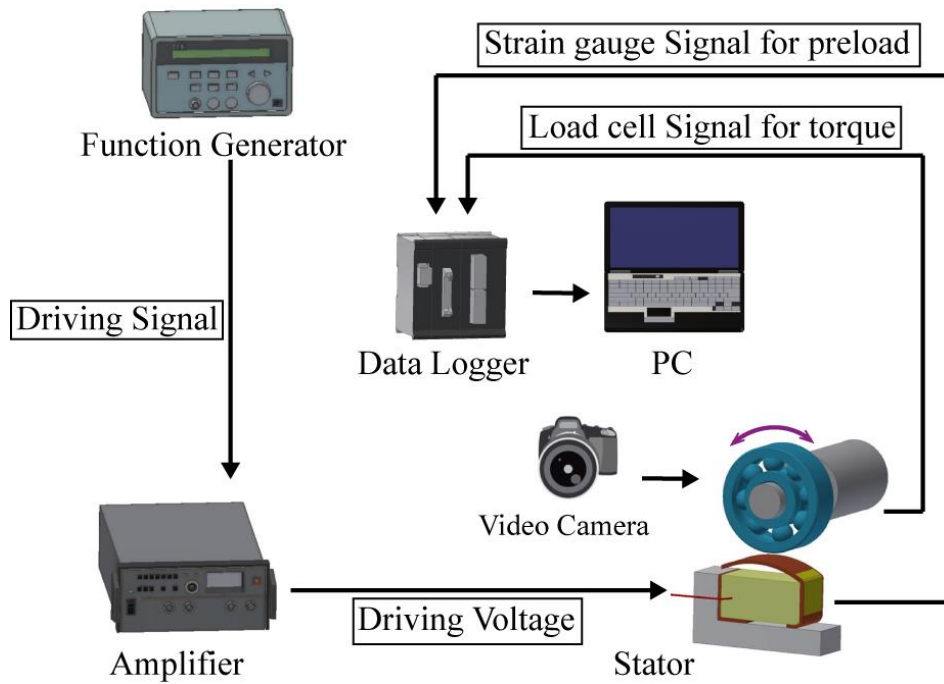


図 5.11 駆動実験の装置構成

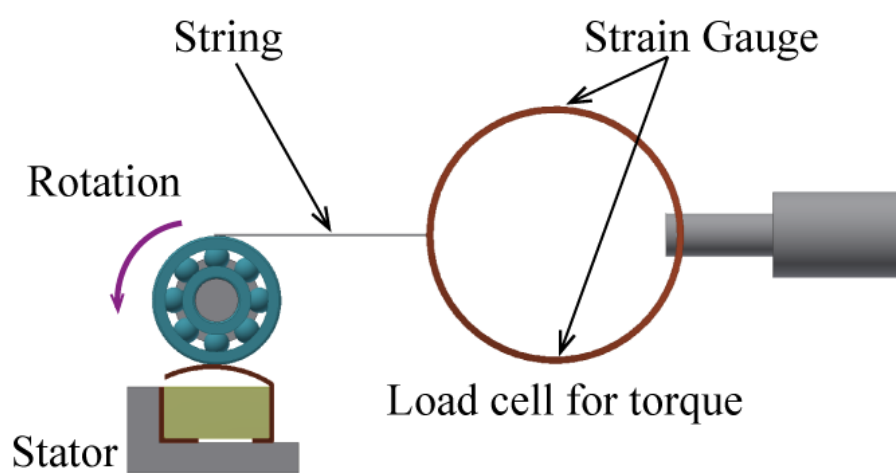


図 5.12 トルクの計測方法

## 5.5.2 駆動性能

ここでは、駆動周波数および回転数と回転トルクを検証した。図 5.13 に駆動周波数と印加電圧の違いによるロータの回転数を示す。回転速度のプラス側は時計回転方向、マイナス側は反時計回転方向を表している。図より、印加電圧が $\pm 4$  V の条件では、駆動周波数が 14.7 kHz で反時計方向に 6.8 rpm、時計方向に 4.1 rpm、47 kHz では反時計方向に 514 rpm、時計方向に 360 rpm の回転数を示し、双方向駆動が可能である。また、印加電圧の低下にともない回転数が減少することが確認できる。しかし、駆動周波数が 87.6 kHz では、反時計駆動信号、時計駆動信号ともに時計回転方向となった。また、このときの予圧は、駆動周波数が 14.7 kHz では約 45 mN、47 kHz では約 10 mN、87.6 kHz では約 40 mN であった。

次に、図 5.14 に、駆動周波数と印加電圧の違いによる回転トルクを示す。回転トルクのプラス側は時計回転方向のトルク、マイナス側は反時計回転方向のトルクを表している。これより、駆動周波数が 14.7 kHz で反時計方向に最大 4.84  $\mu\text{Nm}$  を示した。また、図 5.13 で最高回転数が得られた 47 kHz では 0.43  $\mu\text{Nm}$  となった。なお、このときの予圧は回転数計測実験と同様に 14.7 kHz では約 45 mN、47 kHz では約 10 mN、87.6 kHz では約 40 mN とした。

以上より、駆動方向によって回転速度・回転トルクが異なる結果となったが、板状部材の形状が対称構造になっていないためだと考えられる。

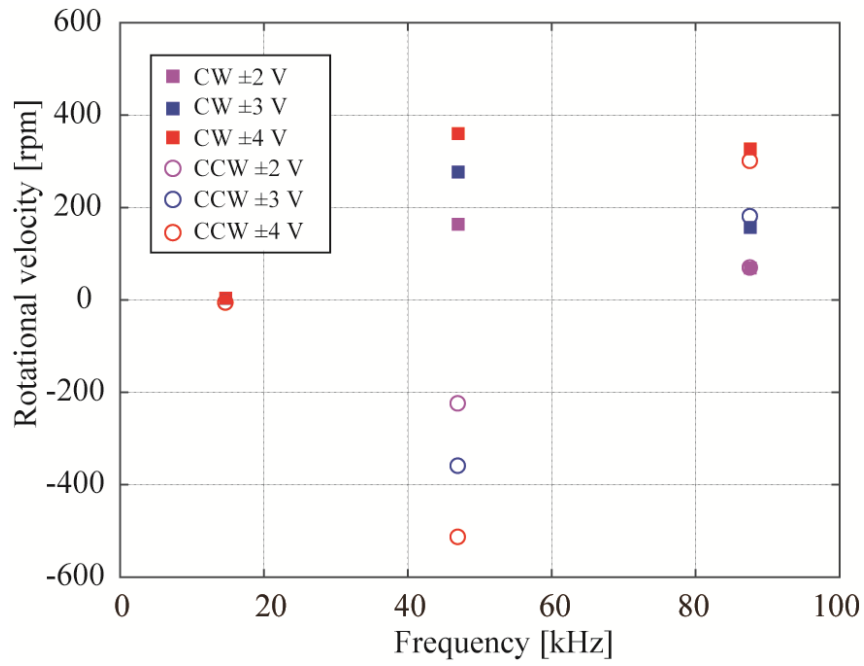


図 5.13 駆動周波数と回転数の関係

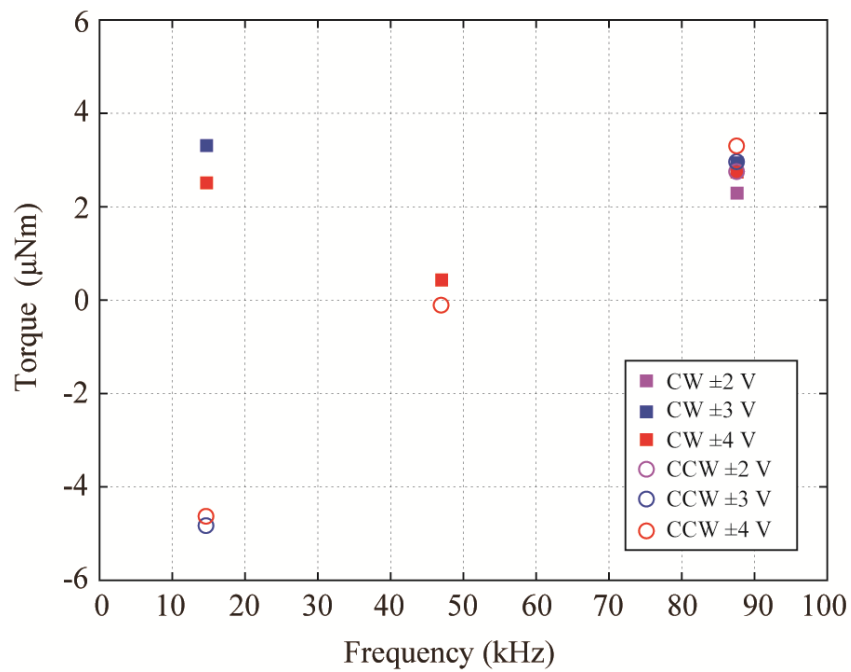


図 5.14 駆動周波数とトルクの関係

## 5.6 性能比較

本章で開発した USM と、参考文献の代表的な USM の性能を表 5.1 に示す。ここで、 $V$  : ステータの体積,  $E$  : 駆動電圧,  $u$  : 回転速度,  $Tr$  : 回転トルク,  $Hz$  : 駆動周波数, 使用する圧電素子の数を示している。前章 4.5 節と同様に, 各 USM は, ステータのサイズや駆動電圧, 駆動周波数が様々であり, 使用する圧電素子の数も異なることから, 単純に回転速度や回転トルクの値のみでは, USM の性能を比較することが困難であるため, 表 5.2 に USM のサイズや駆動電圧等も含めた一覧を示す。ここで,  $u/E$  : 駆動電圧に対する速度,  $u/V$  : 体積に対する速度,  $u/Hz$  : 駆動周波数に対する速度,  $Tr/E$  : 駆動電圧に対するトルク,  $Tr/V$  : 体積に対するトルク,  $Tr/Hz$  : 駆動周波数に対するトルクである。なお, ロータのサイズが明記されている文献については, 回転数から速度に変換して表示している。表 5.1, 表 5.2 より, 本章の USM は同じようなサイズの USM と比較すると, 本章で開発した USM は 1 つの圧電素子のみ使用しているが, 駆動電圧や駆動周波数に対する回転速度や回転トルクは他の文献よりも高いことが確認できる。



表 5.1 参考文献 USM の性能一覧

	V [mm <sup>3</sup> ]	E [V <sub>PP</sub> ]	u [mm/s], [rpm]	Tr [mNm]	Hz [*10 <sup>3</sup> ]	Number of PZT
Mashimo [64]	1	98	90.3 mm/s	0.013*10 <sup>-3</sup>	9.35	4
Morita et al [65]	7.7	20	680 rpm	0.67*10 <sup>-3</sup>	227	4
Kanda et al [66]	18.5	40	3850 rpm	0.025*10 <sup>-3</sup>	69	4
<b>第 5 章の USM</b>	<b>6.4</b>	<b>8</b>	<b>80.7 mm/s (47.0 kHz)</b>	<b>4.87*10<sup>-3</sup> (14.7 kHz)</b>	<b>14.7 47.0</b>	<b>1</b>

V :ステータ体積 [mm<sup>3</sup>], E :駆動電圧 [V], u :速度 [mm/s], Tr :トルク [mNm],  
Hz :駆動周波数 [Hz], Number of PZT :圧電素子の数

表 5.2 参考文献 USM の性能比較

	u/E [*10 <sup>-3</sup> ]	u/V [*10 <sup>-3</sup> ]	u/Hz [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/E [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/V [*10 <sup>-3</sup> ]	Tr/Hz [*10 <sup>-3</sup> ]
Mashimo [64]	921	90300	9.66	0.133*10 <sup>-3</sup>	0.013	1.4*10 <sup>-6</sup>
Morita et al [65]	-	-	-	0.034	0.087	2.95*10 <sup>-6</sup>
Kanda et al [66]	-	-	-	0.625*10 <sup>-3</sup>	1.35*10 <sup>-3</sup>	0.36*10 <sup>-6</sup>
<b>第 5 章の USM</b>	<b>10.1 (47.0 kHz)</b>	<b>12.6 (47.0 kHz)</b>	<b>1.72 (47.0 kHz)</b>	<b>0.61 (14.7 kHz)</b>	<b>0.76 (14.7 kHz)</b>	<b>3.3*10<sup>-4</sup> (14.7 kHz)</b>

u/E :駆動電圧に対する速度, u/V : 体積に対する速度,  
u/Hz :駆動周波数に対する速度, Tr/E :駆動電圧に対するトルク,  
Tr/V :体積に対するトルク, Tr/Hz :駆動周波数に対するトルク

## 5.7 本章の結言

本章では、アーチ型に加工した板状部材を利用した小型の USM を開発した。開発した超音波モータはステータの全長が圧電素子の長さに板状部材の板厚を加えた大ききさで約  $2.7 \times 2.2 \times 1.2$  mm であり、さらに板状部材が予圧調整機構を兼ねる構造となっている。その駆動原理は板状部材を物体に押し付け、振動の往復運動速度を変えることにより双方向に回転駆動させる。回転駆動実験では双方向駆動を確認し、駆動周波数 14.7 kHz の条件下で、反時計方向に 6.8 rpm, 時計方向に 4.1 rpm, 47 kHz では反時計方向に 514 rpm, 時計方向に 360 rpm の回転数を得た。また、最大トルクは 4.84  $\mu$ Nm であった。さらに、印加電圧を変化させることで、回転数とトルクを制御することができる可能性を示した。

しかし、小型 USM を開発することができたが、回転トルクが非常に小さいため、回転速度を計測するためのエンコーダを使用することが難しい。今後、本研究で開発した小型 USM にも対応できるような非接触の回転数計測のセンサの開発が求められる。

## 第 6 章 超音波モータの位置制御法

第 3 章, 第 4 章, 第 5 章では, USM を搭載した機器の開発や新しい USM の開発を検討したが, USM を機器に実装することを想定した場合, USM の位置制御が必要となる. さらに, USM は摩擦駆動方式であるため, 負荷変動や温度上昇などの影響から, その動特性は大きく変動し, 制御性能が低下してしまう. そこで, 本章では, USM の回転速度の低下を定常ゲインが低減したとみなし, ループゲインを一定値に保つ簡易的な適応アルゴリズムを導入した 2 自由度制御法を検討する.

### 6.1 緒言

進行波型 USM は, 同サイズの DC モータなどよりトルクが大きく減速機が不要であり, その形状が電磁型モータと同じ円筒型であり導入しやすいため, 様々な機器で用いられている<sup>[14]</sup>. また, 電磁波を発生しないため, 強磁場環境下で使用することができる長所を生かし, MRI 下で使用する機器のアクチュエータとしても利用されている<sup>[16,17]</sup>.

しかし, その入出力特性は本質的に非線形であり, 圧電素子の誘電損失による発熱や, 摩擦熱の温度上昇, 負荷の影響などにより回転速度特性が大きく変動する<sup>[13,14,21,22]</sup>. このため, 固定ゲインを用いた PID 制御のみでは, 高精度な位置決め制御は困難であるため, 2 自由度制御系のフィードフォワード項により目標値応答特性を保持した上でフィードバック補償を行った方法が提案された<sup>[17]</sup>. また, ニューラルネットワークや入力電圧情報に基づき回転子の位置を推定し, センサレスで位置制御を行う方法<sup>[23,24]</sup>, ファジィアルゴリズムを導入した方法<sup>[25]</sup>, さらに  $H_\infty$  制御に基づいて特性変動を補償する速度制御法<sup>[26,27]</sup>や, USM の温度による特性変動を考慮してロバスト制御を行う方法<sup>[28]</sup>なども提案された. 一方, USM の特性変動に対して PID 制御における各ゲインを, ニューラルネットワークや PSO (Particle swarm optimization) などにより適応的に調整し, 制御性能を補償する方法が提案されている<sup>[29-31]</sup>が, 簡易的な適応アルゴリズムで補償する方法はいまだ提案されていない.

本章では, USM の回転速度の低下を定常ゲインが変動したとみなし, ループゲインが一定値となるようフィードバックコントローラのゲインを適応的に調整する方法を提案する. 本手法の特徴は, これまで提案された手法のように PID の各ゲインをそれぞれ調整するのではなく, ループゲイン 1 つの調整のみでフィードバック特性を適応的に改善できる点にあり, 簡易的な手法でありながら高精度な位置決めを実現できる産業応用が可能な方法である. これは, USM の速度特性が 1 次遅れ要素で近似でき<sup>[67]</sup>, 回転速度特性の低下 (定常ゲインの低

下) や駆動時間の長さに比べて、時定数の変化が無視しても良いほど小さいことに着目したものである。その有効性は、USM の駆動実験を通じて検証する。

## 6.2 超音波モータの特性

本研究では、進行波型 USM として新生工業製 USR30-E3 を用いて実験を行った。本モータの直径は 30 mm, 最大トルクは 0.1 Nm であり、インクリメンタル型ロータリーエンコーダを搭載している。その分解能は 500 ppr であるが、4 通倍処理を行い、2,000 ppr として回転角度を計測した。進行波型 USM は、位相の異なる 2 つの正弦波を圧電セラミックに印加して機械的に進行波を発生させ、物体を駆動するものである。その駆動制御法には、正弦波の振幅を制御する振幅制御方式、正弦波の周波数を制御する周波数制御方式、2 つの正弦波の位相差を制御する位相差制御方式があるが、本研究では入出力特性が比較的線形な位相差制御方式を用いた。制御回路は、シフトレジスタを用いたデジタル回路を CPLD(Complex Programmable Logic Device)上で構成しており、位相差は $\pm 90^\circ$ の間を 128 分割して  $1.406^\circ$ 刻みで調整することができる。ここで、図 6.1 に本研究で用いた CPLD を搭載したブレッドボード(XCM-007, HUMANDATA Corp.) 示す。また、図 6.2 に駆動回路および周辺機器の構成を示す。CPLD ボードには、ユーザ I/O があり、これにより CPLD への入出力が可能となる。本駆動回路は、図 6.3 に示す位相差制御回路のアルゴリズムをプログラム言語により記述した CPLD ボードと、CPLD ボードから出力される信号の電圧を USM の駆動電圧へと昇圧させる昇圧回路(MOSFET, トランス) から構成される。

はじめに、USM の駆動周波数を決定するため位相差を $+90^\circ$ および $-90^\circ$ の一定値として回転速度を求めた。図 6.4 に測定結果を示す。なお、本研究では、文献 [17]と同じ型式のモータを使用したが、非磁性型モータはその個体差が大きいいため、実験データを取得し、結果を再掲載した。図中の実線は位相差を $+90^\circ$ とし正転させた場合の結果、破線は位相差を $-90^\circ$ とし逆転させた場合の結果である。図より、位相差 $+90^\circ$ および $-90^\circ$ ともに、駆動周波数が 50.0 kHz のときに最高回転速度となったが、回転数が若干異なっていた。また、駆動周波数を高くしていくと回転数が減少していくことが確認できた。この結果より、駆動周波数は、正転および逆転の際に同程度の回転数が得られた 51.2 kHz とし、以下の実験を行った。

次に、図 6.5 に位相差制御入力に対する回転速度特性を示す。実験では、位相差を $\pm 90^\circ$ の範囲で変化させ、USM の駆動時間に対する特性変動の影響を評価した。図中の黒線は駆動直後、緑線は 33 s 後、青線は 64 s 後、赤線は 121 s 後の結果である。なお、6.4.1 節の図 6.8 に示す負荷なしの結果から、駆動開始 30 s 以降の追従誤差が大きくなったため 33 s 後を、またこの時刻の約 2 倍となる 64 s

後の特性を示した。図 6.5 より，駆動直後には最高約 $\pm 80$  rpm を示していたが，駆動開始 33 s 後では 75 % (60 rpm)，64 s 後では 63 % (50 rpm)，121 s 後では 38 % (30 rpm) まで回転速度が低下した。また，時間が経過するにつれて，位相差が 0 °付近で USM を回転させることができない不感帯が増加していることが確認できた。これは USM に使用される圧電素子の特性が，温度上昇の影響を受けて変化したためであると考えられる。

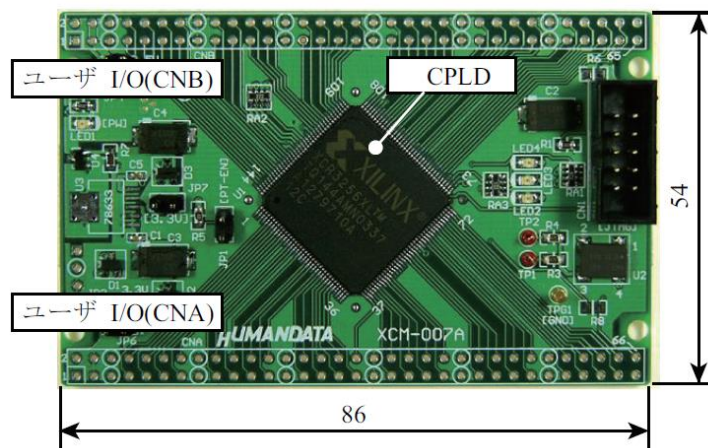


図 6.1 CPLD ボード

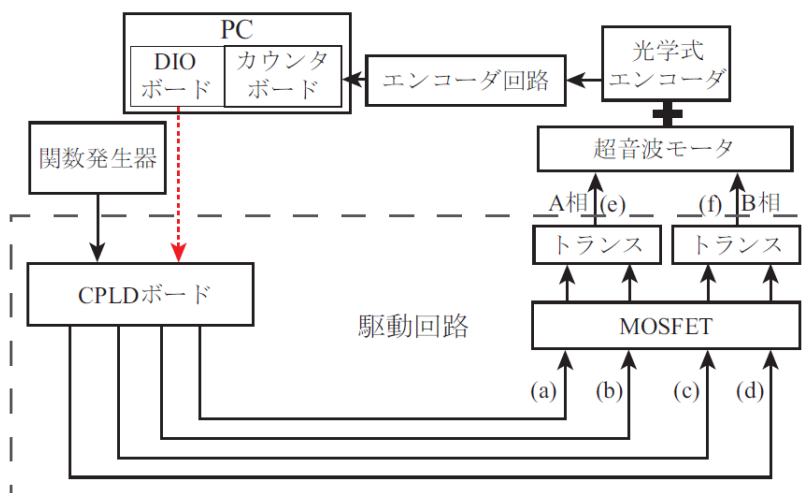


図 6.2 駆動回路および周辺機器の構成

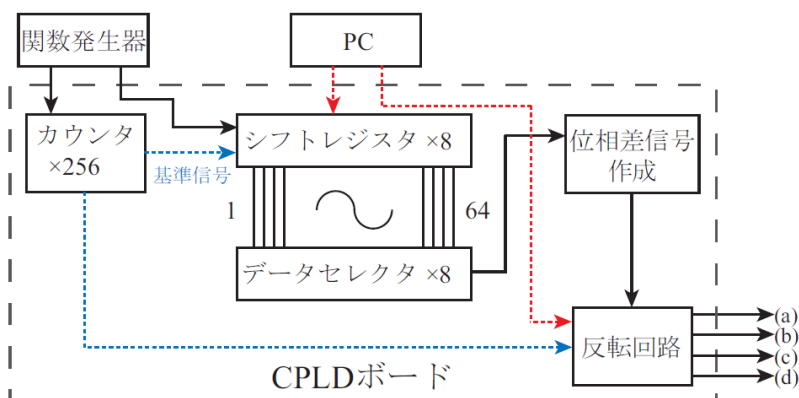


図 6.3 位相差制御回路のアルゴリズム

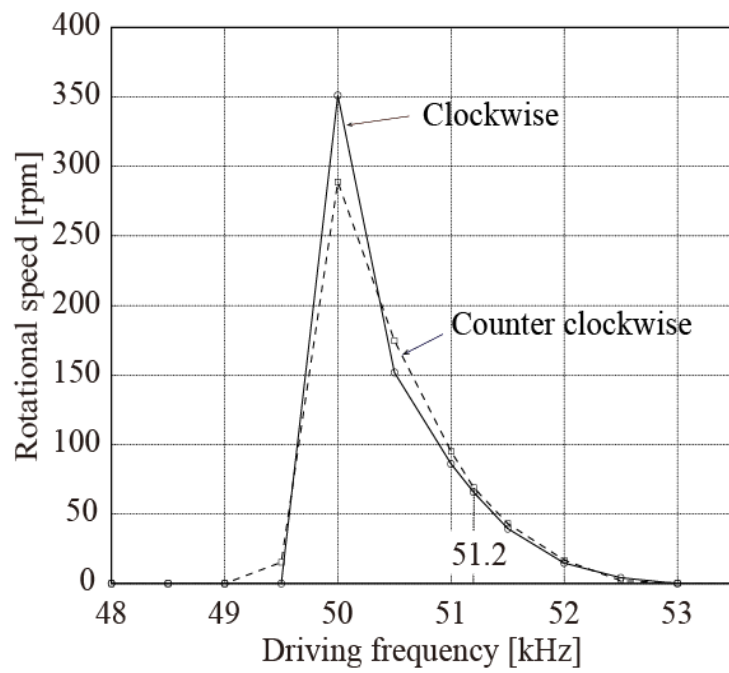


図 6.4 駆動周波数と USM の回転速度の関係

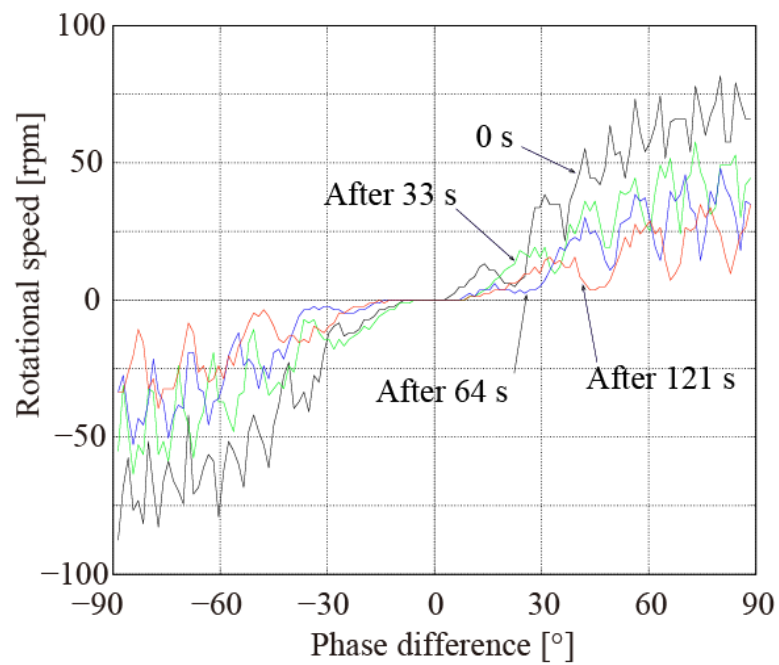


図 6.5 位相差制御入力に対する回転速度特性

## 6.3 制御系の構成

### 6.3.1 2自由度制御系

図 6.6 に本手法の適応アルゴリズムを導入した 2 自由度制御系のブロック線図を示す<sup>[68]</sup>。ここで、 $F(z)$  は規範モデル、 $C(z)$  はフィードバックコントローラ、 $P(z)$  は制御対象のモデル、 $P_u(z)$  は実際の制御対象を表す。また、図中の  $r$  は目標値、 $v$  は規範モデル  $F(z)$  の出力、 $u$  は位相差制御入力、 $x$  は USM の回転速度、 $y$  は USM の角度を表す。さらに、 $G(z)$  は位相差制御入力  $u$  が駆動回路に印加されて USM が回転した際の速度特性を表す伝達関数であり、回転速度  $x$  を積分演算（図中の  $z^{-1}/(1-z^{-1})$ ）することにより角度  $y$  が得られる。なお、 $d$  はループゲインを調整するためのゲインであり、本研究ではサンプリング周期を  $h=5$  ms とした。

この制御系では、制御対象に特性変動がなく、外乱も存在しない場合には、偏差  $e$  はゼロとなり、出力  $y$  は規範モデルの出力  $v$  と一致する。しかし、制御対象が変動する場合や外乱が存在する場合には、偏差  $e$  がゼロとならないため、フィードバックコントローラ  $C(z)$  が動作し特性を補償する。

フィードバックコントローラ  $C(z)$  は、次式で与えられる PID コントローラとした。

$$C(z) = K_P + \frac{K_I z^{-1}}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \quad (1)$$

ここで、PID ゲインは、文献[17]と同じ値とし、 $K_P=3.0$ 、 $K_I=0.5$ 、 $K_D=1.0$  とした。また、規範モデル  $F(z)$  は、次式を離散化した伝達関数とした。

$$F(s) = \left( \frac{m}{s + m} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $m$  は目標値応答の立ち上がりを調整するパラメータである。本研究では、いくつかの  $m$  の値 ( $m=15, 18$  など) で制御性能を検証した結果、いずれも高精度な位置決めを実現することができたが、一般に目標値変化の立ち上がりを速くした場合に追従誤差が大きくなることがあるため、ここでは  $m=20$  の結果を示す。

一方、図 6.6 中の  $G(z)$  は、位相差制御入力  $u$  に対する回転速度  $x$  の伝達関数を示しており、この特性は 1 次遅れ要素で表せることが知られているため、次式で表される  $G(s)$  を離散化した伝達関数とした<sup>[67]</sup>。



$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3)$$

$$G(z) = \frac{bz^{-1}}{1 - az^{-1}} \quad (4)$$

ここで、 $T$  は時定数、 $K$  はゲインであり、駆動実験の結果より  $T=0.0031$ 、 $K=80$  とした。なお、式(3)と式(4)の係数の関係は、次式のとおりである。

$$b = K(1 - e^{-h/T}) \quad (5)$$

$$a = e^{-h/T} \quad (6)$$

しかし、USM は、摩擦駆動原理を採用しているため、駆動に伴って摩擦熱が発生し、回転速度特性が低下する。この場合、 $G(z)$ の係数が変化することになる。そこで、 $G(z)$ を同定しながら変動後の伝達関数を求め、これを陽に考慮した適応アルゴリズムを構築して、高精度な位置決めを実現する。なお、図中の  $z^{-1}/(1-z^{-1})$  は積分器であるため、USM が変動したとしても本特性は変化しない。

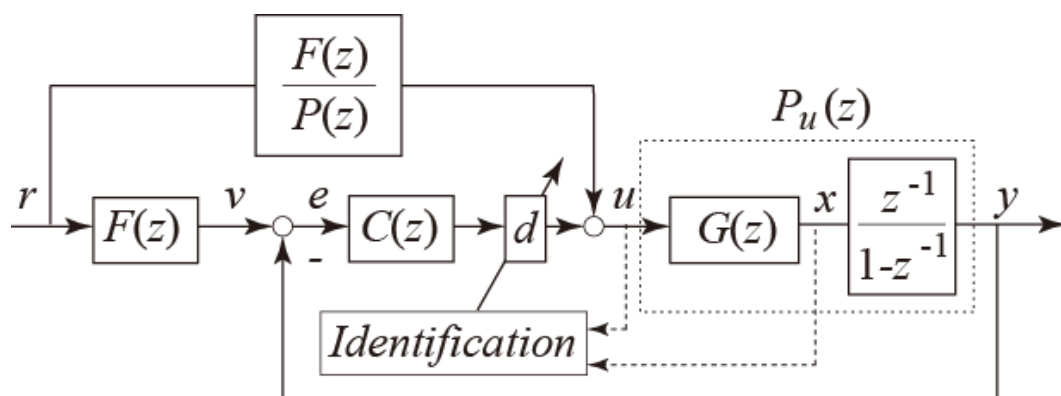


図 6.6 適応アルゴリズムを導入した 2 自由度制御系のブロック線図

### 6.3.2 適応アルゴリズム

図 6.6 に示す 2 自由度制御系では，制御対象  $P_u(z)$  に特性変動があるとき偏差  $e$  はゼロとならず，この特性変動はフィードバックコントローラ  $C(z)$  により補償する．そこで本研究では，前節で述べた駆動に伴う回転速度特性の低下（特性変動）に対し，フィードバックコントローラ  $C(z)$  のゲインを， $d$  を用いて適応的に調整し，ループゲインが一定になるような補償を行うことにより，制御性能を保持する方法について検討する．

図 6.7 に駆動直後のステップ応答に比べて，数秒間駆動した後の応答では回転速度が低下する様子を示す．なお，図 6.7 (a) では駆動直後，図 6.7 (b) では数秒間駆動した後において，時刻  $t_0$  のときにステップ信号が与えられ，得られる速度特性のイメージを示している．なお，図の応答は時定数がサンプリング周期  $h$  より短く， $h$  ごとに得られたデータに基づく応答のイメージで示しているため，折れ線のように表示している．図 6.7 (a) に示すように，USM は，駆動直後は実線のように高い回転速度が得られたとしても，数秒後には駆動に伴う摩擦熱の発生により，図 6.7 (b) の破線のように回転速度が低下する．この特性変動の影響により，時定数  $T$  が  $T_u$ ，ゲイン  $K$  が  $K_u$  のように変わるが，駆動時間の長さに比べると時定数の変化は無視できるほど小さい（著者らが計測した結果は約 0.2 ms であった）．このため，USM の特性変動は，式(3)のゲイン  $K$ （定常ゲイン）のみが変動するものとする．

したがって，制御対象  $P_u(z)$  で定常ゲインの変動が生じたとしても，これを固定してその逆数をコントローラ  $C(z)$  にかけることにより，ループゲインを常に一定値に保つことができるため，特性変動の影響を簡易的かつ適応的に抑制できると考えられる．

具体的には，次のように定式化する．USM の速度特性が変化した場合，制御対象  $P_u(z)$  の中で  $z^{-1}/(1-z^{-1})$  は積分器であるため変化せず，伝達関数  $G(z)$  のみが変わる．このため，変動後の伝達関数  $G_u(z)$  は次式のように表すことができる．

$$G_u(z) = \frac{b_u z^{-1}}{1 - a z^{-1}} \quad (7)$$

ここで，変動するのはゲイン  $K$  の値のみとするため，式(4)の分子の係数  $b$  は  $b_u$  に変化するが，分母の係数  $a$  は変化しない．その結果，特性変動前後の定常ゲインの変化は次式のようになる．

$$\frac{1}{d} = \frac{G_u(1)}{G(1)} = \frac{b_u}{b} \quad (8)$$

このため、ループゲインを一定値に保つには、図 6.6 に示すように、式(8) の逆数をコントローラ  $C(z)$  にかければ良いことになる。

本研究の適応アルゴリズムを導入した制御法の手順をまとめると、以下のようになる。

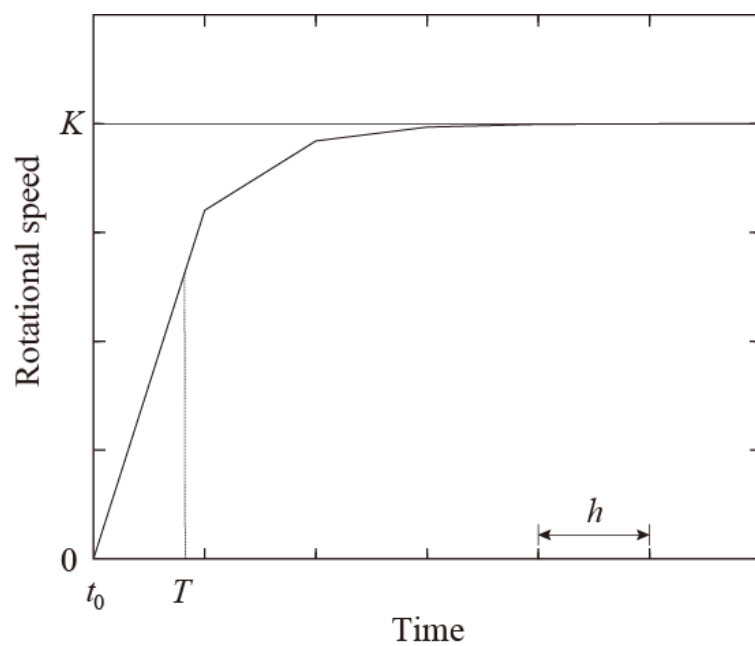
Step 1 : USM のステップ応答より速度特性を求めてモデル伝達関数  $G(z)$  を決定し、定常ゲイン  $G(1)$  を求める。

Step 2 : USM の位相差制御入力  $u$  と回転速度  $x$  の入出力信号を用い、式(7) の伝達関数  $G_u(z)$  を逐次最小二乗法で同定して定常ゲイン  $G_u(1)$  を求める<sup>[69]</sup>。

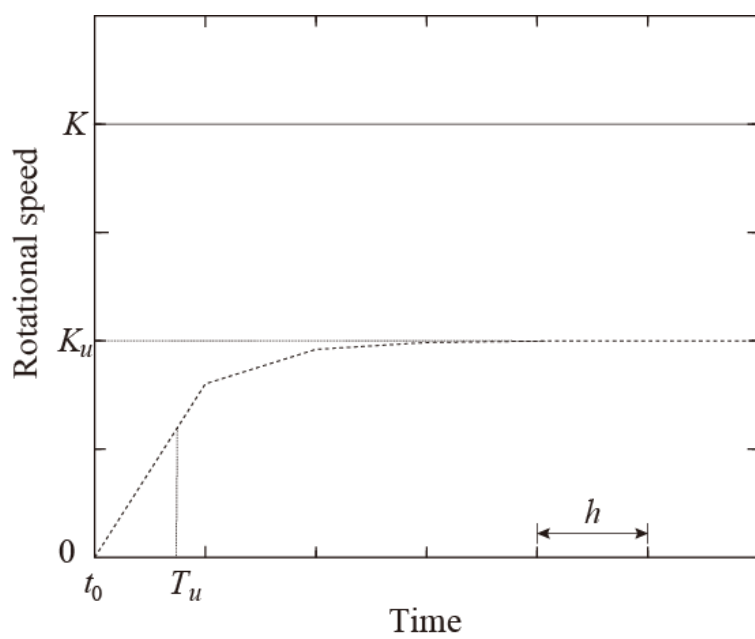
Step 3 : 式(8) のゲインの変動率  $1/d$  を求め、その逆数  $d$  をフィードバックコントローラ  $C(z)$  にかける。

Step 4 : USM の位相差制御指令値を計算し、USM を駆動させる。

Step 5 : Step 2 から Step 4 の手順をサンプリング周期  $h$  ごとに繰り返す。



(a) 駆動直後



(b) 数秒間駆動後

図 6.7 回転速度低下の様子

## 6.4 実験結果

本研究の適応アルゴリズムの有効性を示すため、USM を用いた実験による検証を行い、固定ゲインのPID制御 ( $d=1$ とした場合) と結果を比較した。なお、目標値は $+13.8^\circ$ と $-9.2^\circ$ を2sごとに变化してこれを繰り返す矩形波とし、実験は無負荷の場合と過大な負荷を与えた場合について行った。なお、逐次最小二乗法による同定は、その初期値の設定などの影響により追従誤差が大きくなる場合があったため、駆動0.1s後から行った。

### 6.4.1 無負荷の場合の結果

図6.8に無負荷の場合の結果を、また図6.9に駆動後1.8sから3.0sの拡大図を、図6.10に駆動後33.8sから35.0sの拡大図を示す。図中の一点鎖線(黒色)は目標値 $r$ 、破線(緑色)は規範モデルの出力 $v$ 、実線(赤色)は適応アルゴリズムを用いた結果、点線(青色)は固定ゲインのPID制御の結果を示している。図より、適応アルゴリズムを導入した本手法では、駆動直後も約35s経過した後も規範モデル $F(z)$ の出力 $v$ に追従していることがわかる。一方、固定ゲインのPID制御では、目標値の変化に対して立ち上がりが遅れており、また駆動時間が経過するとオーバーシュートが見られる場合があった。

表6.1に図6.8~図6.10で示した応答曲線におけるUSMの出力 $y$ と規範モデルの出力 $v$ の絶対値誤差の平均値を示す。表より、適応アルゴリズムを導入した本手法の結果は、結果を示した0~35s間、ならびに拡大図で示した区間において、いずれも誤差が $0.12^\circ$ 程度と小さくなっており、高精度な位置決めを実現できたといえる。

図6.11に適応アルゴリズムで求めた $d$ の値の変化を、また図6.12に図6.11の縦軸を拡大した図を示す。図より、駆動後約2s間は値が変動しているが、この原因として $d$ の値は式(8)で示される $1/d$ の逆数であり、 $b$ は $G(z)$ の分子の係数で定数であるが、逐次最小二乗法により同定している $b_u$ の値が変動しているためであると考えられる。一方、目標値 $r$ が変化した後の2.5s付近では多少の変動が見られるものの、その後、徐々に収束していく様子がわかり、本適応アルゴリズムが規範モデルの出力 $v$ への追従性能を向上させていることがわかる。

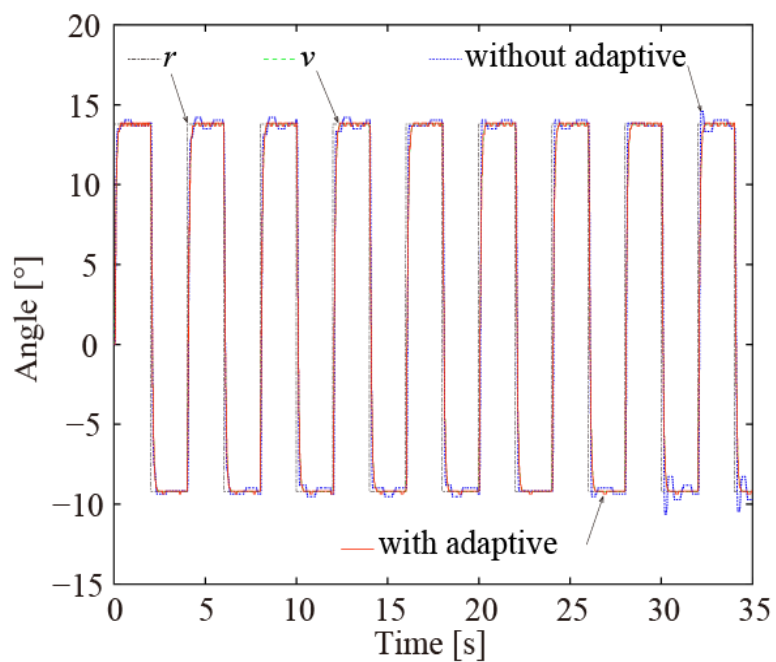


図 6.8 USM の目標値応答

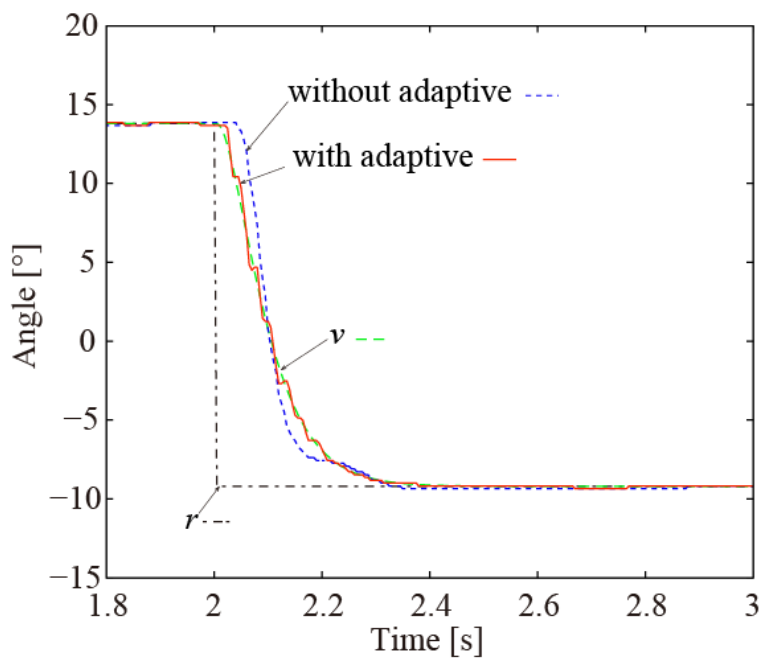


図 6.9 図 6.8 の駆動後 1.8 s から 3.0 s の拡大図

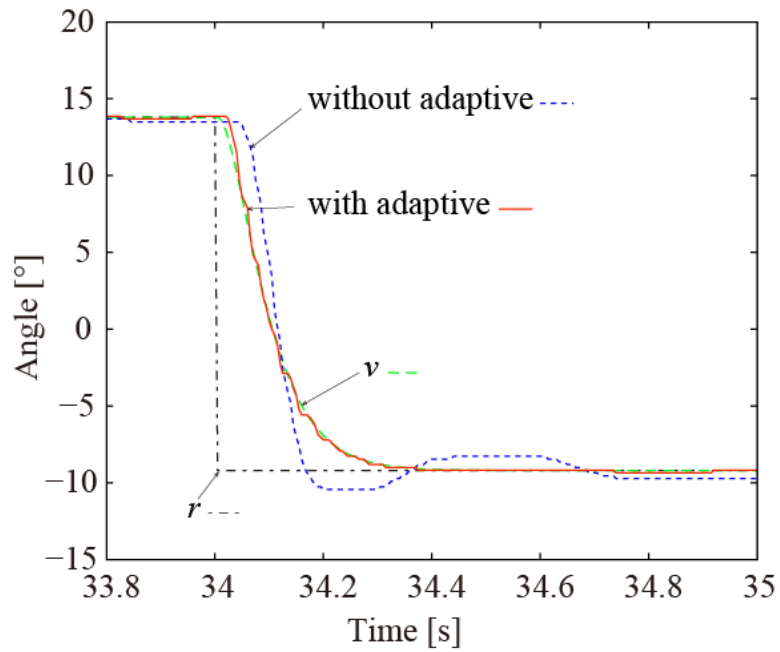


図 6.10 図 6.9 の駆動後 33.8 s から 35.0 s の拡大図

表 6.1 絶対値誤差の平均値 (無負荷)

Time[s]	With adaptive[° ]	Without adaptive[° ]
0-35.0	0.11	0.50
1.8-3.0	0.12	0.46
33.8-35.0	0.12	1.10



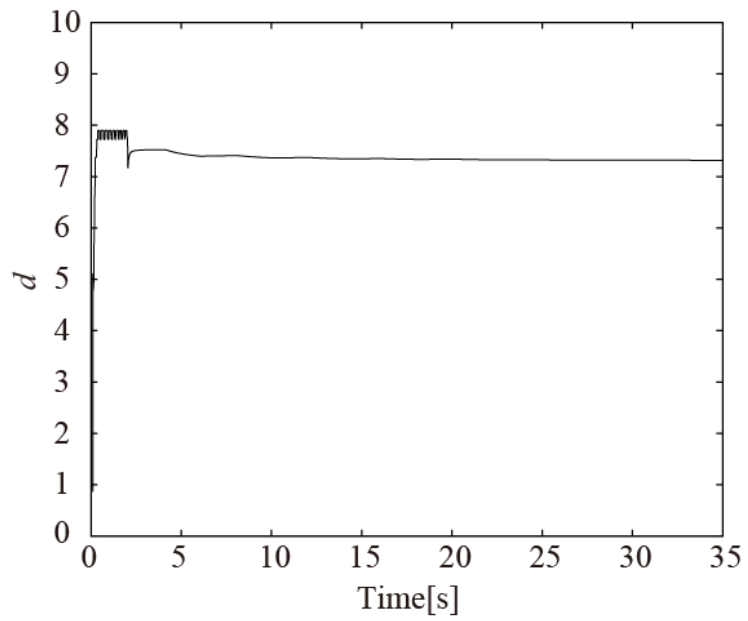


図 6.11 適応アルゴリズムで求めた  $d$  の値の変化(無負荷).

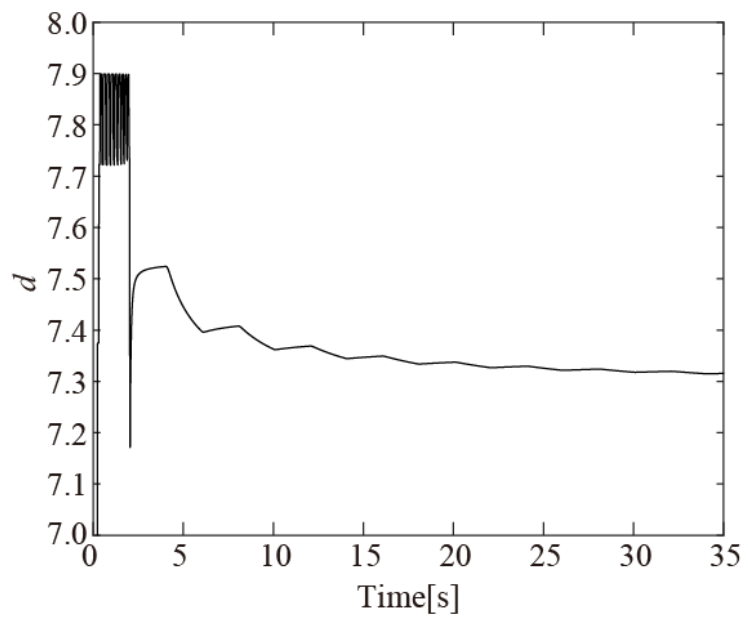


図 6.12 図 6.11 の拡大図

## 6.4.2 負荷がある場合の結果

負荷は、USMの回転軸にUSMと同等の質量に相当する80gのスラスト荷重を取り付けて与えた。この場合の実験結果を図6.10に、また図6.11に駆動後1.8sから3.0sの拡大図を、図6.12に駆動後33.8sから35.0sの拡大図を示す。なお、凡例は、図6.8と同じである。

適応なしの場合（青色点線）、負荷がある場合の図6.13と無負荷の場合の図6.8を比較すると、負荷がある場合の図6.13の結果では、約18s過ぎからオーバーシュートが見られ負荷の影響が顕著に出始めていることが確認できる。一方、適応アルゴリズムを導入した本手法では、無負荷の場合と同様に駆動直後も約30s経過した後も規範モデル $F(z)$ の出力 $v$ に良く追従していることがわかる。しかし、固定ゲインのPID制御では、目標値の変化に対して立ち上がりが遅れており、駆動時間の経過とともにオーバーシュートが見られ、また、その値は徐々に大きくなっていくことが確認できる。表6.2に図6.13～図6.15で示した応答曲線におけるUSMの出力 $y$ と規範モデルの出力 $v$ の絶対値誤差の平均値を示す。表より、適応アルゴリズムを導入した本手法の結果は、結果を示した35秒間ならびに拡大図で示した区間において、いずれも誤差が小さくなっており、負荷を与えた場合でも、高精度な位置決めを実現できたといえる。

図6.16に適応アルゴリズムで求めた $d$ の値の変化を、また図6.17に図6.16の縦軸を拡大した図を示す。図より、無負荷の場合と同じように、駆動後約2s間は値が変動しているが、目標値 $r$ が変化した後の2.5s付近では多少の変動が見られるものの、その後、徐々に収束していく様子がわかる。これにより、負荷がある場合においても、適応アルゴリズムが追従性能を向上させているといえる。

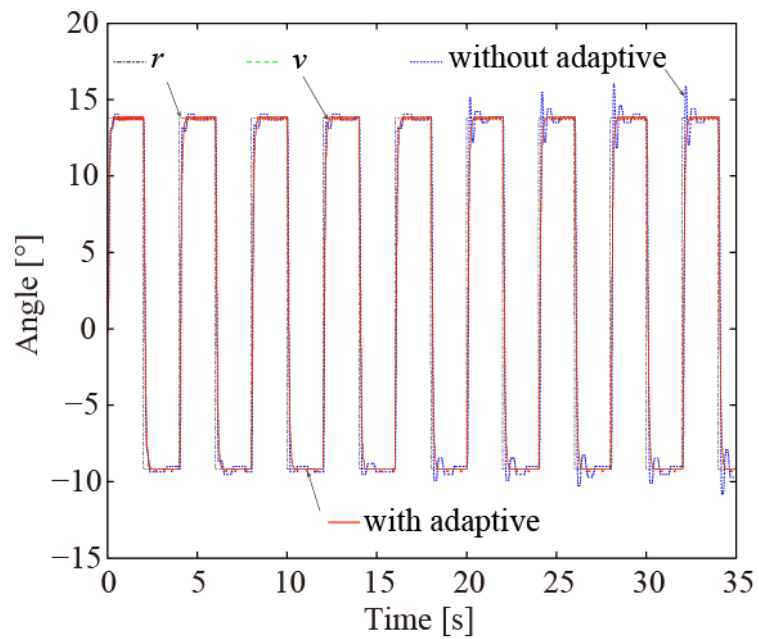


図 6.13 USM の目標値応答(負荷あり)

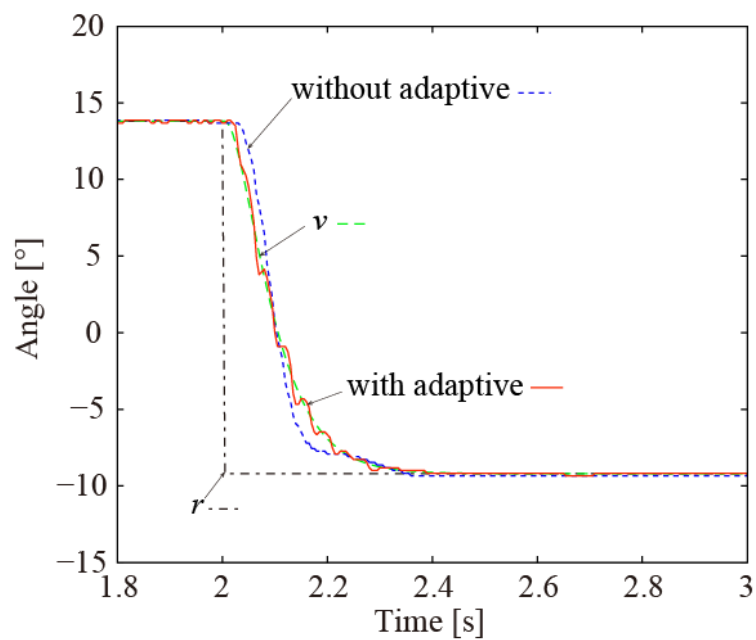


図 6.14 図 6.13 の駆動後 1.8 s から 3.0 s の拡大図

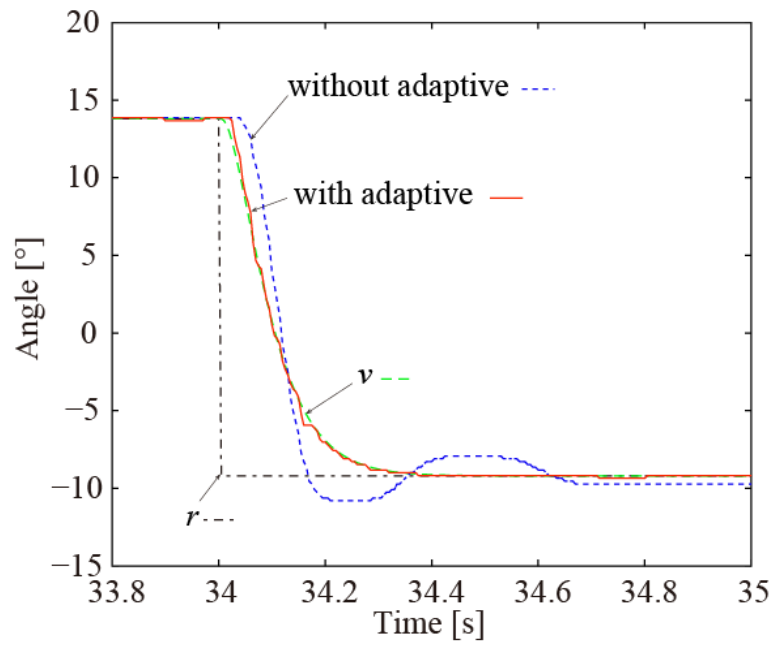


図 6.15 図 6.14 の駆動後 33.8 s から 35.0 s の拡大図

表 6.2 絶対値誤差の平均値（負荷あり）

Time[s]	With adaptive[° ]	Without adaptive[° ]
0-35.0	0.11	0.57
1.8-3.0	0.14	0.43
33.8-35.0	0.11	1.15

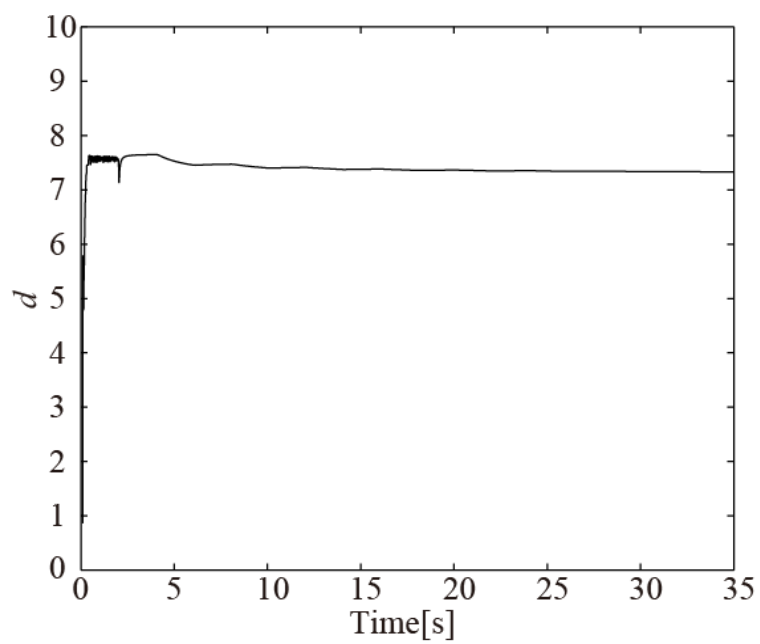


図 6.16 適応アルゴリズムで求めた  $d$  の値の変化(負荷あり).

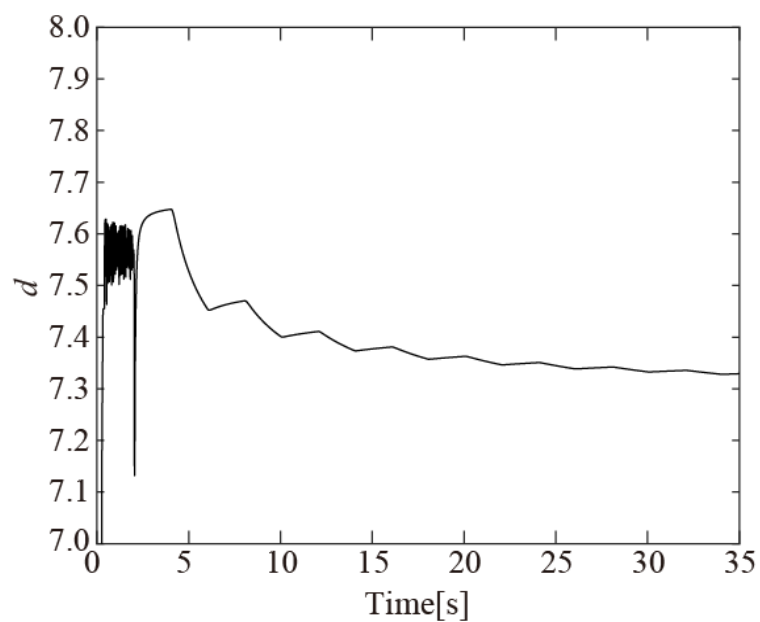


図 6.17 図 6.16 の拡大図

## 6.5 本章の結言

本章では、USM の位置制御において、駆動時間に伴う回転速度特性の低下を定常ゲインが変動したとみなし、フィードバックのループゲインを一定値に保つ簡易的な適応アルゴリズムを導入した 2 自由度制御法を提案した。これは、USM の時定数の変化が、駆動時間に比べて無視して良いほど小さいことに着目したものである。その有効性は、無負荷の場合と過大な負荷を取り付けた場合において、固定ゲインの PID 制御法と結果を比較した。その結果、いずれにおいても追従誤差の絶対値の平均が  $0.12^\circ$  程度であり、高精度な位置決めが可能であることを示した。

## 第 7 章 結論

本研究では、USM を用いた 1/2 インチサイズに対応した配管内検査補修装置の開発と、圧電素子を 1 つのみ使用した双方向駆動が可能な新しいタイプの USM の開発と小型化の検討、さらに簡易的な適応アルゴリズムを導入した USM の 2 自由度制御法を検討した。

本論文の各章の結果を以下にまとめる。

- 第 3 章 定在波型超音波モータを用いた配管内検査装置  
光ファイバ스코ープを用いて、これまで対応が困難であった直径 1/2 インチの配管において、配管内の損傷個所の検査と補修を同時に行うことが可能なレーザー加工ヘッドを開発した。開発した装置の直径は 11 mm であり、2 つの圧電素子を直交配置した定在波型 USM を搭載し、光ファイバ스코ープを通すため中空部を確保した上で回転駆動および直動駆動が可能な検査補修装置である。本装置の動作検証結果から、回転速度は約 2 rpm、直動速度は約 0.1 mm/s であり、目視により損傷部を確認できる性能であること示した。
- 第 4 章 板状部材を用いた超音波モータの開発  
複数個の圧電素子を使用するのではなく、圧電素子を 1 つのみ使用した双方向駆動が可能な新しいタイプの USM を開発した。開発した USM のサイズは約 10×3×2.4 mm であり、圧電素子と板状部材を直列配置したシンプルな構造のモータである。本 USM は圧電素子の変位量が板状部材のたわみ変形により変位が拡大される機構であり、駆動原理は板状部材を物体に押し付け、振動の往復運動速度を変えることにより双方向の回転駆動を可能にする。回転駆動実験により双方向駆動を確認し、駆動周波数が 12.9 kHz、予圧が 15 N の条件下で、回転速度が 16.5 rpm、最高トルクが 39 mNm の性能が得られた。
- 第 5 章 板状部材を用いたミニチュア超音波モータの開発  
小型電子機器等への実装が可能な大きさの USM の小型化を目指し、第 4 章で開発した超音波モータで使用した圧電素子のサイズより小さい圧電素子を使用し、曲げ加工したアーチ形状の板状部材と圧電素子を組み合わせたミニチュア USM を開発した。開発した USM はステータの全長が圧電素子の長さに板状部材の板厚を加えた大きさで約 2.7×2.2×1.2 mm であり、さらに板状部材が予圧調整機構を兼ねる構造となっている。駆動原理は板状部材を物体に押し付け、振動の往復運動速度を変えることにより双方向に回転駆動

を可能にする。回転駆動実験により双方向駆動を確認し、駆動周波数 14.7 kHz の条件下で、反時計方向に 6.8 rpm, 時計方向に 4.1 rpm, 47 kHz では反時計方向に 514 rpm, 時計方向に 360 rpm の回転数を得た。また、最大トルクは 4.84 uNm の性能が得られた。

- 第 6 章 超音波モータの位置制御法

USM の回転速度の低下を定常ゲインが低減したとみなし、ループゲインを一定値に保つ簡易的な適応アルゴリズムを導入した 2 自由度制御法を提案した。本手法は、1 つのゲイン調整のみで制御性能を補償でき、その有効性は超音波モータを用いた実機実験により検証した。その結果、適応アルゴリズムの有無で比較すると、無負荷の場合と負荷がある場合ともに追従誤差の絶対値の平均が  $0.12^\circ$  程度であり、高精度な位置決めが可能であることを示した。

以上より、今後、様々な分野において、機器の小型化・高精度化等が急速に進んでいくことが予想され、本論文で開発したこれまでに無かった配管検査補修装置や、1 つの圧電素子のみで双方向駆動が可能な USM や、制御手法が導入されていくことが予想され、これからの産業界に大きく貢献できると期待できる。

今後の課題と展望として、様々な形状や駆動原理の USM の研究開発が進められているが、それぞれの用途に応じたものがほとんどであり、汎用性が高い USM は非常に少ないのが現状である。さらに、複数個の圧電素子を使用したものが多い。今後は同一の USM を用いて回転駆動・直動駆動が可能となるような汎用性の高い USM が求められると思われる。

一方、USM などのアクチュエータをフィードバック制御する場合には、変位や速度情報を瞬時に得る必要がある。アクチュエータの小型化に成功したとしても、装置に実装する際は、大きさの制限から変位や速度情報を得るセンサを組込むことが出来ない場合があるため、さらなる小型のセンサ類の開発にも期待したい。



## 参考文献

- [1] 土谷武士, 深谷健一: メカトロニクス入門, 森北出版, (1994)
- [2] 武藤高義: アクチュエータの駆動と制御, コロナ社, (2003)
- [3] 川崎晴久: ロボット工学の基礎, 森北出版, (2001)
- [4] 永瀬純也, 重本佳孝: “管内走行を目的とした円筒状湾曲型弾性クローラの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol 33, No. 1, pp.55-62 (2015)
- [5] Tomonori YAMAMOTO, Masashi KONYO, Kenjiro TADAKUMA, Satoshi TADOKORO: “A Flexible In-Pipe Robot Capable of Moving in Open Spaces via a Pneumatic Rotary Mechanism”, IFAC Papers ON Line, Vol. 50, No.1, pp.1050-1055 (2017)
- [6] Byungkyu Kim, Moon Gu Lee, Young Pyo Lee, YongIn Kim, GeunHo Lee: “An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator”, Sensors and Actuators A, Vol. 125, pp.429-437 (2006)
- [7] 岡潔, 西村昭彦, 関健史, 赤津朋宏, 山下卓弥: “複合型光ファイバを用いた1インチ伝熱管用観察補修レーザー加工ヘッドの開発”, 保全学, Vol 8, No. 4, pp.37-42 (2010)
- [8] A. Nishimura, T. Shobu, K. Oka, Toshihiko Yamaguchi, Yukihiro Shimada, O.Mihalache, Akihiro Tagawa, Takuya Yamashita: “Development of Inspection and Repair Technology for the Micro Cracks on Heat Exchanger Tubes”, レーザー加工学会誌, Vol. 17, No.4 pp 207-212 (2010)
- [9] B.Gorissen, R. Donose, D. Reynaerts, M. De Volder: “Flexible pneumatic micro-actuators: analysis and production”, Procedia Engineering, Vol. 25, pp. 681-684(2011)
- [10] Tsung-Han Tsai, Benjamin Potsaid, Yuankai K. Tao, Vijaysekhar Jayaraman, James Jiang, Peter J. S. Heim, Martin F. Kraus, Chao Zhou, Joachim Hornegger, Hiroshi Mashimo, Alex E. Cable, and James G. Fujimoto: “Ultrahigh speed endoscopic optical coherence tomography using micromotor imaging catheter and VCSEL technology”, Biomedical Optics Express, Vol. 4, No. 7, pp. 1119-1132 (2013)
- [11] Shohei Ueno, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, GeunHo Lee: “Micro inchworm robot using electro-conjugate fluid”, Sensors and Actuators A, Vol. 216, pp.36-42 (2014)
- [12] 見城尚志, 指田年生: 超音波モータ入門, 総合電子出版社, (1991)
- [13] 内野研二: 圧電/電歪アクチュエータ-基礎から応用まで, 森北出版, (1986)
- [14] 内野研二, 石井孝明: マイクロメカトロニクス, 森北出版, (2007)
- [15] 米竹淳一郎, 遠山茂樹: 超音波モータを用いたパワーアシストスーツの開発

- 発～モータ開発と駆動制御～, ライフサポート, Vol.18, No.4, pp. 142-147, (2006)
- [16] Hiroaki Naganou, Hiroshi Iseki, and Ken Masamune: “MRI Compatible Modular Designed Robot for Interventional Navigation - Prototype Development and Evaluation -”, Lecture Notes in Computer Science (MICCAI2004), pp. 1069-1070, (2004)
- [17] 長縄明大, 山尾拓也, 佐藤生馬, 岡正人, 田中幹也, 正宗賢: MRI 対応穿刺治療ナビゲーションロボットの高精度制御, 日本 AEM 学会誌, Vol.18, No.2, pp. 79-85, (2010)
- [18] Jia-Si Mo, Zhi-Cheng Qiu, Jun-Yang Wei, Xian-Min Zhang: “Adaptive positioning control of an ultrasonic linear motor system”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 44, pp.156–173, (2017)
- [19] James Hunt, Bharat Bhushan: “Device level studies of adaptive optics sliding components in microprojectors”, Microsyst Technol, Vol. 18, pp.137–148, (2012)
- [20] Akihiro Iino, Kenji Suzuki, Masao Kasuga, Makoto Suzuki, Takashi Yamanaka: “Development of a self-oscillating ultrasonic micro-motor and its application to a watch”, Ultrasonics, Vol. 38, pp.54–59, (2000)
- [21] 櫻田陽, 森英季, 江藤真人, 長縄明大, 渋谷嗣, 大日方五郎: “積層型圧電素子を用いたアクチュエータにおける強制冷却の効果”, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 29-30 (2012)
- [22] 株式会社トーキン: “積層圧電アクチュエータ”, カタログ, Vol.1 (2017)
- [23] 千住智信, 吉田知洋, 上里勝実, S.K.Panda: “ニューラルネットワークを用いた超音波モータの速度センサレス制御”, Technical Report of IEICE.NC2003-10, pp. 17-22 (2003)
- [24] 千住智信, 吉田知洋, 中村充, 浦崎直光, 舟橋俊久, 関根秀臣: “入力電圧情報に基づく超音波モータのセンサレス位置制御”, 電気学会論文誌C, Vol.126, No.11, pp. 1393-1400 (2006)
- [25] 千住智信, 柏木智裕, 吉田知洋, 上里勝実: “ファジィ推論を用いた不感帯補償による超音波モータの位置制御”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 14, No.2, pp. 190-197 (2002)
- [26] 小林泰秀, 木村哲也, 矢鍋重夫: “ステータの振幅に依存するゲインスケジュールド $H_\infty$ 制御に基づく超音波モータのロバスト回転速度制御”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 15, No.8, pp. 430-437 (2002)
- [27] 小林泰秀, 藤岡久也, Tharathip Vongsoroj, 矢鍋重夫: “サンプル値 $H_\infty$ 制御に基づく超音波モータの速度追従制御”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 71, No.705, pp. 155-161 (2005)
- [28] Tavallaei, M. A., Atashzar, S. F. and Drangova, M: “Robust Motion Control of Ultrasonic Motors under Temperature Disturbance”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.63, No.4, pp.2360-2368 (2016)

- [29] 田中幹也, 岡正人, 内堀晃彦, 岩田洋一郎, 森岡弘: “NN併用型PID制御器を用いた超音波モータの精密位置決め制御”, 電気学会論文誌, Vol.122, No.8, pp. 1317-1324 (2002)
- [30] 長縄明大, 藤枝昌史, 田中幹也, 岡正人, 若佐祐治: “NN併用型2自由度MRACSに基づく超音波モータの位置制御”, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.6, No.1, pp. 1-7 (2007)
- [31] 田中幹也, 村田裕介, 西村悠樹, Faridah, A. R., 岡正人, 内堀晃彦: “超音波モータのPSOを用いた可変ゲイン型PID制御”, 日本AEM学会誌, Vol.18, No.3, pp. 294-299 (2010)
- [32] 長縄明大, 小松和三, 「しゃくとり虫変形を利用した駆動装置」特許第6124331号
- [33] Akihiro Naganawa, Kazumi Komatsu, Hisashi Ito, “Development of an ultrasonic motor that uses an inchworm shaped deformation of a metallic plate”, World Journal of Engineering and Technology, 4, pp.100-106, (2016)
- [34] 吉田龍一, 岡本泰弘, 樋口俊郎, 浜松玲: スムーズインパクト駆動機構(SIDM)の開発, 精密工学会誌, Vol.65, No.1, pp.111-115, (1999)
- [35] 前野隆司: 超音波モータ, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.1, pp.10-14, (2003)
- [36] 森田剛: 圧電現象, 森北出版, (2017)
- [37] 中村健太郎: 超音波モータの30年とこれから, 超音波 TECHNO 2019年3・4月号, pp.1-5 (2019)
- [38] B.Watson, J. Friend, L. Yeo: “Piezoelectric ultrasonic micro/milli-scale actuators”, Sensors and Actuators A, Vol. 152, pp.219-233, (2009)
- [39] Yuxin Peng, Yulong Peng, Xiaoyi Gu, Jian Wang, Haoyong Yu: “A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method”, Sensors and Actuators A, Vol. 235, pp.240-255, (2015)
- [40] Shupeng Wang, Weibin Rong, Lefeng Wang, Hui Xie, Lining Sun, James K. Mills: “A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: Classifications, principles, connections and distinctions”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 123, pp.591-605, (2019)
- [41] 株式会社新生工業 HP,  
[http://www.shinsei-motor.com/techno/ultrasonic\\_motor.html](http://www.shinsei-motor.com/techno/ultrasonic_motor.html), 2019年10月アクセス
- [42] 黒澤実: 超音波モータの原理と応用, 日本設計工学会誌, Vol.29, No.2, pp.54-58, (1994)
- [43] 松田信也, 松尾隆: 二本の圧電素子を直交して配置するマイクロアクチュエータ, コニカミノルタ技術レポート, Vol.2, pp.101-104, (2005)
- [44] Xiangyu Zhou, Weishan Chen, Junkao Liu: “A novel multi-mode differential

- ultrasonic motor based on variablemode excitation”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 230, pp.117–125, (2015)
- [45] V. Dabbagh, Ahmed A.D. Sarhan, J. Akbari, N.A. Mardi: “Design and experimental evaluation of a precise and compact tubular ultrasonic motor driven by a single-phase source”, *Precision Engineering*, Vol. 48, pp.172–180, (2017)
- [46] Edouard Leroy, José Lozada, Moustapha Hafez: “A curved ultrasonic actuator optimized for spherical motors: Design and experiments”, *Ultrasonics*, Vol. 54, pp.1610–1619, (2014)
- [47] Takuma Nishimura, Hiroshi Hosaka, Takeshi Morita: “Resonant-type Smooth Impact Drive Mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped Langevin transducer”, *Ultrasonics*, Vol. 52, pp.75–80, (2012)
- [48] Yuting Ma, Husain Shekhani, Xintao Yan, Minkyu Choi, Kenji Uchino: “Resonant-type inertial impact motor with rectangular pulse drive”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 248, pp.29–37, (2016)
- [49] Y. Zhang and G. Yan: “In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting”, *Mechatronics, Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, pp.1618-1631 (2007)
- [50] J. Lim, H. Park, J. An, Y.-S. Hong, B. Kim and B.-J. Yi: “One pneumatic line based inchworm-like micro robot for half-inch pipe inspection”, *Mechatronics*, Vol. 18, No. 7, pp.315-322 (2008)
- [51] 山田浩, 梶壽隆, 木村正, 貞本敦史, 須藤肇: “高密度3次元実装技術を用いたマイクロカメラ視覚システム”, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 6, No. 2, pp.161-167 (2003)
- [52] 寺田隆哉, 西村昭彦, 岡潔, 森山拓, 松田宏康: “レーザー加工トーチを用いた配管表面肉盛溶接技術の研究”, *保全学*, Vol 13, No.4, pp.87-94 (2015)
- [53] 寺田隆哉, 西村昭彦, 岡潔, 外山亮治, 橋内大輔: “レーザーを用いた配管検査補修装置の開発”, *日本保全学会第12回学術講演会要旨集*, pp.379-380 (2015)
- [54] 西村昭彦, 竹仲佑介, 岡潔, 外山亮治, 寺田隆哉, 峰原英介: “レーザー熱加工による保全ロボットの開発と展開”, *日本保全学会第13回学術講演会要旨集*, pp.113-114 (2016)
- [55] Z. Minghui, G. Wei and S. Lining: “A multi degree of freedom ultrasonic motor using in-plane deformation of planar piezoelectric elements”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 148, pp 193-200 (2008)
- [56] K. Takemura, S. Park and T. Maeno: “Control of multi-dof ultrasonic actuator for dexterous surgical instrument”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.311,

- pp.652-666 (2008)
- [57] 真下智昭, 遠山茂樹: “単一ステータによる回転直動圧電アクチュエータの開発(第2報)-TR モータの諸特性-”, 精密工学会誌, Vol. 75, No.3, pp.379-384 (2009)
- [58] 米竹淳一郎: “摩擦摺動による球体アクチュエータ”, コニカミノルタ技術レポート, Vol.9, pp.43-46 (2012)
- [59] 伊東真美子, 長縄明大: “定在波型超音波アクチュエータの低速駆動法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.775, pp.1086-1089 (2011)
- [60] F.Dubois, C.Belly, A.Saulot, Y.Berthier: “Stick-slip in stepping piezoelectric Inertia Drive Motors – Mechanism impact on a rubbing contact”, Tribology International, Vol. 100, pp. 371-379 (2016)
- [61] Soonho Park, Siyuan He: “Standing wave brass-PZT square tubular ultrasonic motor”, Ultrasonics, Vol. 52, pp. 880-889 (2012)
- [62] Tianshi Wang, Charles Lancée, Robert Beurskens, John Meijer, Bart Knapen, Antonius F.W. van der Steen, Gijs van Soest: “Development of a high speed synchronous micro motor and its application in intravascular imaging”, Sensors and Actuators A, Vol. 218, pp. 60-68 (2014)
- [63] Toshiyuki Ueno, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Toshiro Higuchi: “Miniature spherical motor using iron-gallium alloy (Galfenol)”, Sensors and Actuators A, Vol. 154, pp. 92-96 (2009)
- [64] Tomoaki Mashimo: “Micro ultrasonic motor using a one cubic millimetre stator”, Sensors and Actuators A, Vol. 213, pp. 102-107 (2014)
- [65] Takeshi Morita, Minoru Kuribayashi Kurosawa, Toshiro Higuchi: “A cylindrical shaped micro ultrasonic motor utilizing PZT thin film (1.4 mm in diameter and 5.0 mm long stator transducer)”, Sensors and Actuators A, Vol. 83, pp. 225-230 (2000)
- [66] Takefumi Kanda, Akira Makino, Tomohisa Ono, Koichi Suzumori, Takeshi Morita, Minoru Kuribayashi Kurosawa: “A micro ultrasonic motor using a micro-machined cylindrical bulk PZT transducer”, Sensors and Actuators A, Vol. 127, pp. 131-138 (2006)
- [67] 青柳誠司, 小田高広, 神谷好承, 岡部佐規一: “超音波モータの高速・精密位置決め制御に関する研究”, 精密工学会誌, Vol.59, No.2, pp. 299-304 (1993)
- [68] 杉江俊治, 藤田政之: “フィードバック制御入門”, コロナ社 (1999)
- [69] 足立修一: “MATLABによる制御のためのシステム同定”, 東京電機大学出版局 (1996)

## 謝辞

本論文は秋田大学大学院理工学研究科博士後期課程総合理工学専攻において、本学大学院理工学研究科 長縄明大教授のご指導の下、行った研究をまとめたものです。

本学への入学、ならびに本研究内容をまとめる機会を与えてくださり、終始懇切丁寧なご指導・ご助言と、公私にわたる温かいご配慮を賜りました秋田大学大学院理工学研究科 長縄明大教授には深く感謝いたします。

秋田大学大学院理工学研究科 田子真教授には温かいご指導をいただきましたことを感謝いたします。

秋田大学大学院理工学研究科 巖見武裕教授には多くのご指導を頂きましたことを感謝いたします。

株式会社 OK ファイバーテクノロジー 岡潔技術顧問には論文投稿にあたり丁寧なご指導をいただきましたことを感謝いたします。

お世話になった秋田大学教職員の皆様、秋田大学長縄研究室学生の後輩諸君に感謝いたします。

温かいご理解とご協力を頂いた秋田県産業技術センター 赤上陽一所長はじめ、研究員および職員の方々に感謝いたします。

岩手大学 岩淵明学長ならびにお世話になった職員の方々には多くのご激励を頂きましたことを感謝いたします。

最後に、本研究に携わることができたことと、お世話になった方々に感謝するとともに、いつもそばで見守り励ましてくれた家族に感謝の意をこめまして謝辞とさせていただきます。

## 研究業績

### レフェリー制のある学術雑誌

- (1) 小松和三, 長縄明大 : ループゲイン調整型適応アルゴリズムに基づく超音波モータの位置制御, 産業応用工学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp.39-46, (2019)
- (2) Kazumi Komatsu, Akihiro Naganawa, Yoshinori Ueno, Emilia Abadjieva, Hisashi Ito : Development of an Ultrasonic Motor Introducing a Curve-shaped Metallic Plate, Universal Journal of Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 2, pp.47-51, (2017)
- (3) 小松和三, 関健史, 長縄明大, 岡潔, 西村昭彦 : 1/2 インチ配管内の検査補修用レーザー加工ヘッドの開発, 保全学, Vol. 16, No. 3, pp.89-95, (2017)

### 国際会議

- (1) Kazumi Komatsu, Yutaro Hatanaka, Emilia Abadjieva, Hisashi Ito, Akihiro Naganawa : Development of a Miniature Ultrasonic Motor Using a metallic Plate, 2017 the International Conference on Robotics and Mechantronics (ICRoM), Paper ID: RM005-A, 201, (2017)
- (2) Yutaro Hatanaka, Kazumi Komatsu, Emilia Abadjieva, Hisashi Ito, Akihiro Naganawa : Study of Ultrasonic Motor with Mechanism to Increase the PZT Displacement, 2017 the International Conference on Robotics and Mechantronics (ICRoM), Paper ID: RM004-A, (2017)
- (3) Akihiro Naganawa, Emilia Abadjieva, Yoshinori Ueno, Kazumi Komatsu, Hisashi Ito, Valentin Abadjiev : Development of Ultrasonic Motors which Combine a Piezoelectric Element with a Curve-shaped Metallic Plate, 13th National Congress Theoretical and Applied Mechanics (13th NCTAM), Book of Abstracts, 38-39, (2017)
- (4) Akihiro Naganawa, Kazumi Komatsu, Hisashi Ito : Development of an Ultrasonic Motor That Uses an Inchworm Shaped Deformation of a Metallic Plate, World Journal of Engineering and Technology, Vol. 4, 100-106, (2016)

## 口頭発表

- (1) 畠中優太郎, 長縄明大, 小松和三, 伊藤尚志: ベルクランク機構を導入した超音波モータに関する研究, 2018 年度精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, 査読無, 25-26, (2018)
- (2) 小松和三, 長縄明大, 関健史, 伊藤尚志: 板状部材を用いた小型超音波モータの性能検証(第2報)-板状部材の挙動について-, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 査読無, 559-560, (2016)
- (3) 上野禎徳, 小松和三, 長縄明大, 関健史, 伊藤尚志: 湾曲板状部材を用いた超音波モータの開発, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 査読無, 561-562, (2016)
- (4) 小松和三, 安部祐樹, 長縄明大, 関健史, 伊藤尚志: 板状部材を用いた小型超音波モータの性能検証, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 査読無, 395-396, (2016)
- (5) 安部祐樹, 長縄明大, 小松和三, 関健史, 伊藤尚志: 板状部材の変形を利用した超音波モータの開発, 2014 年度精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, 査読無, 35-36, (2014)

## 特許

- (1) 長縄明大, 小松和三, 「しゃくとり虫変形を利用した駆動装置」特許第 6124331 号
- (2) 長縄明大, 小松和三, 畠中優太郎, 「ベルクランク型駆動装置及び動力伝達駆動装置」特願 2017-229590

## 外部資金

- (1) 科学研究費補助金(研究活動スタート支援)「板状部材を利用した高汎用性ミニチュア超音波モータの開発」, 課題番号 19K23526, 2019
- (2) 科学研究費補助金(奨励研究)「スムーズインパクト駆動を利用した小型高汎用性超音波モータの開発」, 課題番号 17H00343, 2017
- (3) 科学研究費補助金(奨励研究)「スムーズインパクト駆動を利用した高汎用性超音波モータの開発」, 課題番号 16H00352, 2016