

## 2022 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	京都先端科学大学 ナガモリアクチュエータ研究所
職位または役職	助教
氏名	出原 俊介

### 1. 研究題目

小型 UAV のための超小型超音波モータの開発

### 2. 研究目的

無人航空機(UAV)は、撮影や輸送、検査など様々な用途に使用されている。その中でも、災害現場のような人がアクセスできない危険な場所や狭い空間などでの、UAV による情報収集は生存者の迅速な救助を可能にしている。一般的に、UAV のサイズが小さいほど、より狭い空間へのアクセスが可能となるため、実用性が高まる。UAV は飛行機構によって「羽ばたき翼系」や「回転翼系」などに分類されるが、どのような機構でも UAV の構成部品をミリメートルスケールに小型化することは容易ではない。特に十分な揚力を生成することができるマイクロモータの開発は大きな課題となっている。

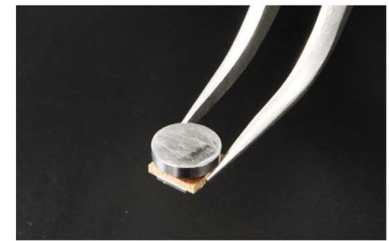
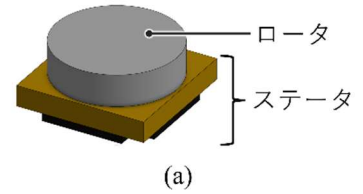
これまで、様々な駆動原理を用いたマイクロモータが開発されてきた。一般的なモータである電磁モータは、コイルや軸受けなどの構成部品が多く、小型化に伴って出力が著しく低下するため、現在のサイズより小さくすることは難しい。静電モータは MEMS 技術によって超小型化が可能であるが、トルクが非常に小さく十分な性能が得られない。超音波モータはトルク密度が高く、構造がシンプルであることから高性能マイクロモータとして期待されている。従来の研究では、駆動原理として中空円筒形ステータ(直径約 1.5 mm, 長さ 5 mm)の曲げ振動モードを用いている。曲げモードは大きな振動振幅によって高いトルクを生成できるが、ステータが短くなると振幅は大きく減少してしまう。そのため、ステータが短くても大きなトルクが発生できる小型化に適した振動モードを検討する必要がある。

本研究は大きさ 1mm×1mm×0.6mm の超小型超音波モータを開発し、小型 UAV に応用することを目的とする。開発する超音波モータは、駆動原理に平板の振動モードを使用することで、従来の超音波モータよりも小さく設計することができる。また、シンプルなステータ構造であるため、特別な装置を必要とせず加工や組み立てを行うことが可能である。最終的には、開発した超音波モータに小型のプロペラを取り付け、小型 UAV の実現可能性を検証する。

### 3. 研究内容及び成果

#### 1. 小型回転モータの駆動原理

開発した回転超音波モータを図 1 に示す。モータは平板ステータ、ロータで構成されている。ステータは中央に穴が開いた金属板と 4 枚の圧電素子で構成されている。圧電素子は厚み方向に分極されており、外側が正極である。負極は金属部品に接着されており、グランドとして機能する。ロータはステータの上に配置され、ステータの振動が摩擦を介してロータに伝わることで回転させる。提案する超音波モータは、圧電素子に交流電圧を印加して図 2 に示す曲げ振動モードの組み合わせを駆動原理として回転を発生させる。この振動モードは従来の小型超音波モータの駆動原理に使用される円筒曲げ振動モードとは異なり、薄板形状で励起される薄いステータの作製が可能である。また、低次の曲げひずみ振動モードを使用しているため、曲げひずみ振動で駆動する一般的な超音波モータと比較して、少ない数の圧電素子(電極)で駆動させることが可能である。



(b)

図 1 (a)提案するモータ  
(b)試作したモータ

#### 2. 小型回転モータの試作

図 1(b)は、試作した超音波モータを示している。圧電素子を含めたステータの寸法は幅 4.5mm, 長さ 4.5mm, 厚さ 1.0mm である。金属部品はリン青銅, 圧電素子は PZT のハード材を使用している。圧電素子は、導電性エポキシ接着剤を使用して4つの金属底面に接着されている。ロータはステンレス鋼の円筒で、直径は 5.0 mm, 重量は 300 mg である。これらのモータの部品は、他の超音波モータより単純な構造である。金属部品はリン青銅板からフライス加工され、圧電素子は半導体製造で一般的に使用されるダイシングソーで切断される。

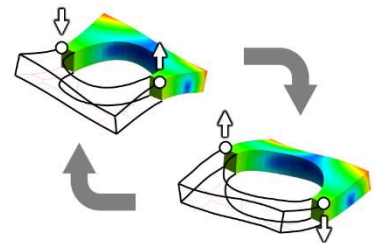


図 2 使用する振動モード

#### 3. 試作したモータの性能評価

小型超音波モータの過渡応答を測定して、試作したモータの性能を評価した。図 3 は、電圧振幅 100 V<sub>p-p</sub>, 周波数 180 kHz の交流電圧を印加したときの過渡応答を示している。この時のトルクは 22.7 μNm で定常速度は 74.4rad/s であった。このモータの出力は小型の部品を動かすには十分である。

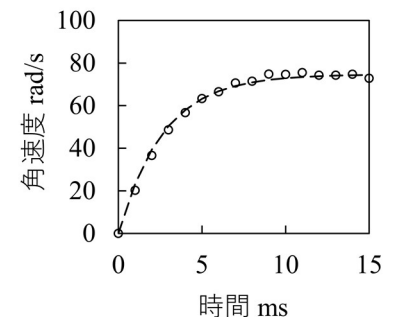


図 3 ステップ応答

#### 4. 試作したモータの小型化

駆動原理の検証ができたので、モータのさらなる小型化を行った。提案したモータはシンプルな構造であるため、特別な加工方法を用いることなく作製できる。図 4 に試作した小型超音波モータを示す。ステータの大きさは幅 2mm, 長さ 2mm, 厚さ 1mm である。試作した小型超音波モータは実際に駆動することに成功している。当初の目標では 1mm サイズに小型化する予定であったが、圧電素子の加工および入手性の問題で 2mm サイズへの変更となった。さらに小型化するためには、圧電素子の形状変更や振動モードを 31 モードではなく 15 モードにするなどの変更が必要である。

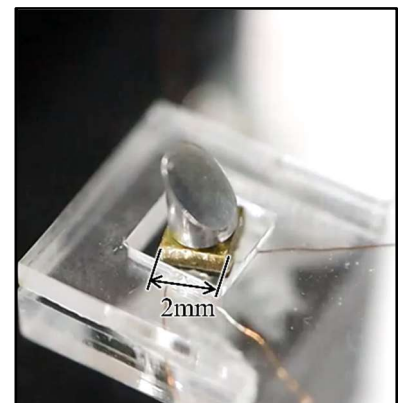


図 4 試作した小型モータ

#### 4. 今後の研究の見通し

図 2 に示す振動モードによって 2mm サイズに小型化してもモータが駆動することが明らかとなった。そこで、まず作製した 2mm 超音波モータの評価を行う。具体的には、予圧特性、電圧特性や周波数特性を調査する。さらに、印加電圧の印加時間と回転数、トルクの関係も明らかにする。また、目標である小型 UAV を開発するために、ロータと予圧機構そしてプロペラが一体となった機構の設計にも着手している。

さらに、別のアプリケーションへの応用も検討する。内視鏡は、カメラが取り付けられた細長い検査機器で、検査効率向上と患者の負担軽減に貢献している。しかし、内視鏡の径が細くなるにつれ、カメラの向きを変え広い視野を確保するのが難しくなる。そこで、小型超音波モータと回転ミラーを使って、小型カメラの視野を素早く変更して、狭い空間での観察が可能にする機構開発を目指す。提案する視野拡大機構は図 5 に示すような小型超音波モータ、ロータ、カメラで構成されている。ロータは直径約 2mm の円筒形で、45 度の角度でカットされた面が鏡となっている。小型超音波モータと小型カメラを組み合わせた視野拡大機構を開発し、カメラはミラーに反射された映像を撮影して周辺 360 度を見ることができるようになる。視野拡大機構は、直径 5mm の円筒内に収めることを目標とし、性能を評価する。モータの回転を制御するため、図 6 に示す制御システムを構築する。このシステムは、カメラでモータの回転を監視し、操作者が映像を基に回転量を入力してドライバで印加電圧を制御する。超音波モータの回転は主に印加電圧の位相差と印加時間によって制御され、これらの値を調整できるコントローラとドライバを作製する。制御システムの性能評価では、モータの過渡応答や周波数応答を測定して評価する。

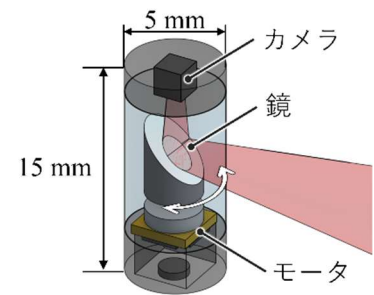


図 5 視野拡大機構

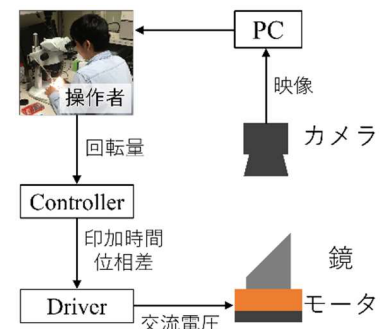


図 6 制御システム

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議(査読無)

1. 出原俊介, 藤谷月帆, 福島宏明, “低次振動モードで駆動する薄型超音波モータの試作”, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023, 愛知, 6 月, 2023 年.
2. 藤谷月帆, 出原俊介, 福島宏明, “平板二次曲げ振動で駆動する小型超音波モータ”, 第 41 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2023) 宮城, 9 月, 2023 年.