

《様式B》

研究テーマ	「 カプセル内視鏡用マイクロ超音波モータの試作と制御 」		
研究責任者	所属機関名	豊橋技術科学大学	
	官職又は役職	准教授	
	氏名	真下 智昭	メールアドレス mashimo@eiiris.tut.ac.jp
共同研究者	所属機関名		
	官職又は役職		
	氏名		

(平成 27 年度募集) 第 28 回 助成研究 完了報告書

上記様式記載後

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要 (1, 000 字程度)

医療機器や携帯機器などへの応用を目指して、マイクロアクチュエータの研究開発が行われている。これまでに、電磁力、静電気、形状記憶合金、機能性流体、磁歪効果などを駆動原理としたものなどが研究開発されてきたが、中でも圧電効果を用いた超音波モータは、他の駆動原理と比べ、体積あたりに発生できるトルクが大きいこと、シンプルな構造で加工性に優れることから期待が大きい[1]。超音波モータの小型化は、これまでも大学や研究機関で取り組まれているが、これらは概ね直径 1.5mm、長さ 5mm 程度の細長い円筒形状をしているものが多い。円筒状ステータの周囲に接合された圧電素子に電圧をかけることで、曲げの振動モードを励起し、ロータの回転を得るしくみである。この曲げの振動モードでは、形状が長い時は大きな振幅を発生できるが、形状が短くなると振幅が小さくなり、結果的に出力も減少する。したがって、それらのマイクロモータをさらに小型化することは難しい。これまでに報告されているもので最も小さい超音波モータは[2]、圧電素子や予圧機構部品を含めると、全体で約 2~3mm の大きさであり、そのトルクは非常に小さく、13nNm と報告されている。小型化に伴ってトルクが減少するのは避けられず、1mm 程度のサイズまで小型化すると、かろうじて回る程度のトルクしか出せなかった。

著者は、約 1mm の小型超音波モータの開発を行っている[3]。ステータは、一辺の長さが 1 ミリメートルの立方体の金属部と、その周囲に接着された 4 枚の圧電素子で構成される。その金属立方体の中心には貫通穴が開けられており、その穴に回転軸（ロータ）が通されている。貫通穴の内周面とロータの外周面は接触している状態である。貼りつけられた圧電素子に電圧が印加されると、ステータが振動を発生し、それがロータに伝達し、ロータは回転する。

本研究では、カプセル内視鏡への応用を目指してマイクロ超音波モータの開発を実施した。マイクロ超音波モータの重要な課題の一つは、予圧機構を含むモータ構造全体を小型化し、簡単な方法でカプセル内に取り付け可能にすることであったが、取り付け容易なマイクロ超音波モータを試作することに成功した。さらに、マイクロ超音波モータの力学特性を明らかにし、実験を行うことで、トルクや回転数の制御が可能になることも明らかにした。

産業技術として実用化の可能性：有（ただし近年中の実用化はまだ困難）

特許出願の有無：無

2. 実施内容および成果の説明（A 4で、5 ページ以内）

2.1 予圧機構の設計開発

超音波モータでは、一般に、ステータとロータ間の予圧を上げることでより出力トルクを向上することが可能である。これまでに、ロータの両側に取り付ける錘の量を変えることで、予圧の大きさを調整できることを実験で示した。最も高いトルクが得られるよう

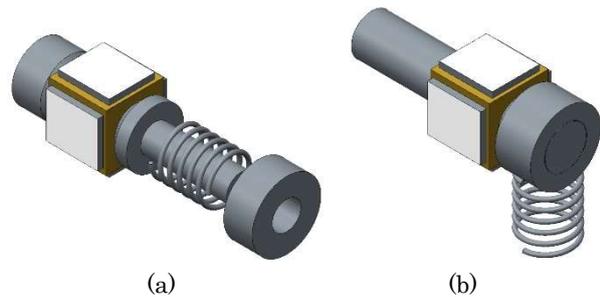


図1 マイクロ超音波モータのための小型予圧機構

に予圧を調整し、 $80V_{p-p}$ の電圧を印加して、 $10\mu Nm$ 以上のトルクを得られることを明らかにしている [3]。しかしながら、錘を用いた実験装置は、ステータのサイズと比べて、錘のサイズがはるかに大きく実用的な大きさではない。また、ロータはステータの穴に通されただけの構造であるため、ステータが傾くとモータ性能が変化するなどの問題がある。これらの問題を解決するためには、錘に代わって、ステータと同じような超小型サイズで予圧を適切に与えられる予圧機構を開発することが重要である。

そこで、図1のように、直径1mm以下のマイクロコイルを用いて予圧を発生することができるような二種類の予圧発生機構を提案する。図1(a)は、ステータの中心穴にロータが通されており、マイクロコイルを用いて軸方向に予圧をかけるアイデアである。コイルによって押されたロータが、ステータの穴部の縁と線状に接触する。この予圧方法は、過去の小型超音波モータ研究に用いられたものと同様である[4]。図1(b)は、ステータの中心穴にロータが通されている点は同じであるが、マイクロコイルを用いて半径方向に予圧

をかけるものである。このとき、ステータの内周面にロータの外周面が、面状に接触することになる。予圧する方法として、軸方向予圧と半径方向予圧（図 1 (a) と (b)）のいずれが優れているかは、実験で明らかにする必要がある。また、それぞれの予圧の最適値もまた実験で調査する必要がある。そこで、二種類の予圧発生機構を開発し、実験および調査を行う。実験装置は、予圧の値を変更および計測できるようにし、予圧の値を変えたときにどのようにモータの出力トルクが変化するかを調べられるようにする。

2.2 実験装置

実験に用いるステータは、一辺の長さが 1 ミリメートルの立方体の金属部材と、その周囲に接着された 4 枚の圧電素子で構成される。金属立方体の中心には貫通穴が開けられており、その穴に回転軸（ロータ）が通されている。貼りつけられた圧電素子に電圧が印加されると、ステータが振動を発生する。これがロータに伝達し、ロータは回転する。振動モードには、穴の内周面に沿って 3 波発生するものを用いている。このステータの利点は、シンプルな構造で試作がしやすいことである。モータの小型化は、構成する部品が小型化できるかがポイントになる。提案するステータは金属立方体に穴を開けるだけなので非常に加工性が良く、圧電素子は薄い板材から望みの大きさおよび形状に切り出すことができ、金属部との接着も容易である。

ステータとロータ間にはたらく予圧を変えた場合のモータ性能を評価するための実験装置について述べる。図 2 (a) は、軸方向に予圧を与えることのできる実験装置である。ステータには、ロータが通されている。ロータの片端には軸受が取り付けられており、ロッドとロータが軸受を介して連結する構造になっている。図のように、ロータ端部の軸受を軸方向に押すことによって、ステータとロータの間に予圧を与える。ロッド位置は一軸ステージによって軸方向に微調整することが可能である。ロッドと、ステージの間にロード

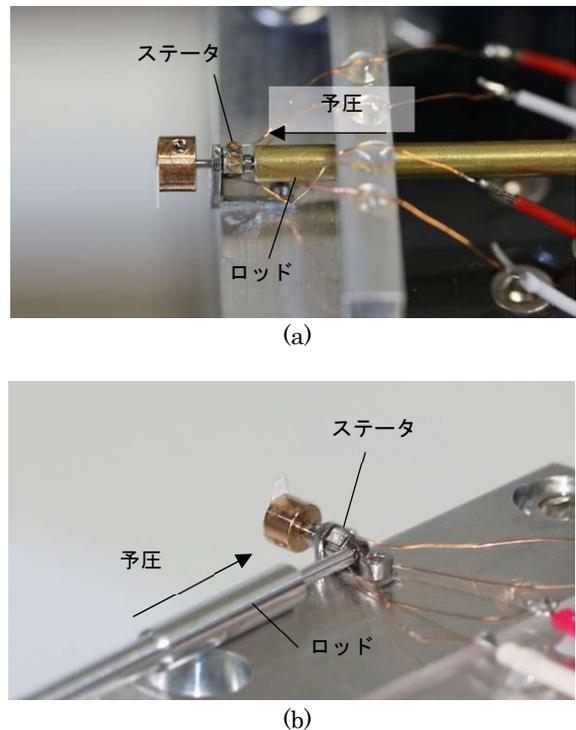


図 2 予圧を変更可能にした実験装置

セルが設置してあり、このロードセルの値を予圧の値として計測することができる。また、図2(b)は、半径方向に予圧を与えることのできる実験装置である。軸方向と同じく、ロータ端部には軸受が取り付けられている。この軸受を、ロッドと一軸ステージによって半径方向から押すことによって、ステータとロータの間に予圧を与える。またロッドと一軸ステージの間にはロードセルがあり、予圧値が計測できる。

マイクロ超音波モータを駆動するための印可電圧は、波形発生器で発生し、高周波アンプを用いて増幅し、圧電素子に印加する。評価対象は、軸方向に予圧を与えられたマイクロ超音波モータと、半径方向に予圧を与えられたものの二種類である。予圧方法を公平に評価するために、実験に用いるステータは、軸方向と半径方向の両方の装置で、同じものを用いている。モータに印可する電圧の振幅は $80V_{p-p}$ 、周波数は $980kHz$ で一定とする。この周波数はステータの共振周波数である。ロータの回転数を計測するためには、ハイスピードカメラを用いる。(一般に回転数の計測に使われるロータリーエンコーダでは、粘性摩擦や慣性モーメントの影響が、マイクロモータにとっては大きすぎるため)。ハイスピードカメラによって撮影されたフレームごとの角度変位から回転数を計算する。トルクは、慣性モーメントと角加速度から計算することができる。回転数の過渡応答を取ると、最初に最大値をつけるので、この最大値を用いてトルクを計算することになる。

2.3 実験結果

軸方向および半径方向に予圧を与える実験装置において、予圧を大きくしていった場合の、マイクロ超音波モータが生ずるトルクと回転数を計測した。その様子が、図3である。

実験結果では、軸方向予圧と半径方向予圧共に、予圧が大きくなるにつれトルクが上昇することがわかる。これはステータとロータ間に働く摩擦力が向上することが理由と考えられる。また、回転数は、予圧が大きくなるにつれ減少する傾向にある。これはステータとロータの間に働く摩擦が上

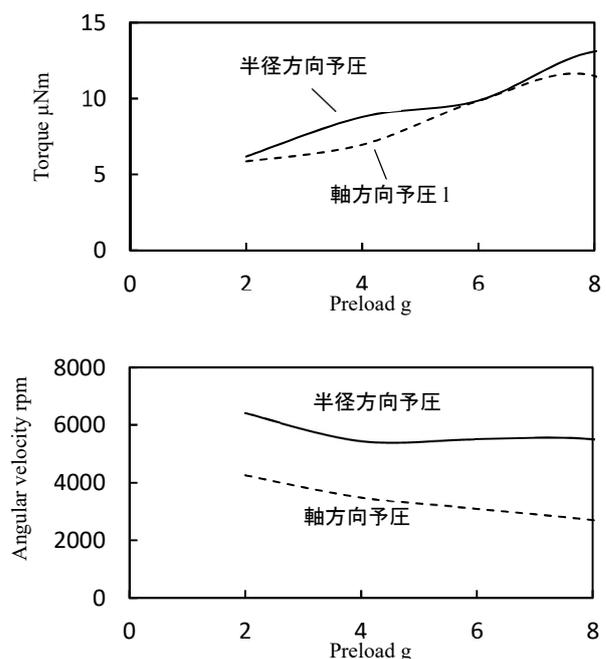


図3 トルクと回転数の予圧依存性

昇し、減衰係数もまた上昇することで説明できる。予圧を 8g としたときに $10\ \mu\text{Nm}$ 以上のトルクが得られている。予圧が 10g 以上の場合では、電圧を印加したにも関わらず、モータが回転しない場合が生じたが、これは線接触が理由で摩擦力が高すぎるためであると考えられる。

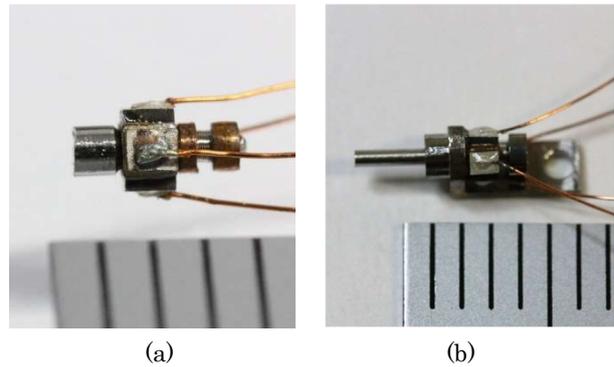


図4 カプセル内に取付可能なマイクロ超音波モータ

2.4 小型予圧機構を用いたマイクロ超音波モータの開発

マイクロコイルを用いた小型予圧発生機構を搭載したマイクロ超音波モータを試作した。図4 (a) は軸方向に予圧を与えられるマイクロ超音波モータである。ロータの長さは約 3mm であり、めねじ径 0.5mm のナットを締めつけると、マイクロコイルが縮んで軸方向に予圧が生じるようになっている。長さ 1mm のコイルが 0.6mm まで縮んで約 5g の予圧が発生する設計である。図4 (b) は、半径方向に予圧を与えられるマイクロ超音波モータである。ロータの長さは約 4mm であり、端部に玉軸受が取り付けられている。この軸受は、内径 0.5mm、外径 1.5mm であり入手できる玉軸受では最も小さいものである。ブラケットと軸受の間にマイクロコイルを挿入することによって予圧を発生する。これも軸方向の予圧と同様のマイクロコイルを用いており、約 5g の予圧が発生する設計にしている。小さい軸受ではあるものの、相対的には大きく、半径方向の予圧を用いた場合は、比較的サイズが大きいものになる。これらのモータに電圧を印可すると、いずれの予圧発生機構においても、約 $10\ \mu\text{Nm}$ のトルクを得ることができている。約 $10\ \mu\text{Nm}$ というトルクは、半径 1mm で 1g の力を発生するものであり、小さな部品を駆動するのであれば十分に大きいトルクを得ることに成功している。次の段階では、カプセル内への実装を検討していくこととなる。

参考文献

1. T. Morita, "Miniature piezoelectric motors," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 103, pp. 291-300, 2003.
2. B. Watson and et al., Piezoelectric ultrasonic resonant motor with stator diameter less than 250 μm : the Proteus motor, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 19, (2009).
3. T. Mashimo, Performance Evaluation of a Micro Ultrasonic Motor Using a One-Cubic-Millimeter Stator, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 62(2015) 1819-26.