

平成 30 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

超多自由度メッシュロボットによる触覚／力覚提示

令和 元年 5 月
国立大学法人 東京農工大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立大学法人 東京農工大学が実施した平成30年度「超多自由度メッシュロボットによる触覚／力覚提示」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 0 委託業務の目的

超多自由度メッシュロボットによる触覚／力覚提示の実現に向けて以下に示す要素技術開発を行う。

1) マイクロ超音波モータの開発

超音波モータの技術を応用し、サイズが $3\times 3\times 3\text{ mm}$ のサイコロ型の回転型の超音波モータを開発する。モータには超小型の歯車機構を採用し、出力トルクの増大をはかる。また、回転軸に微小な着磁を施し、ホール素子で回転角を検出する。製作の簡易化と安定化のため、モータは可能な限り簡単な構造とする。モータの試作・評価を通じて性能の向上をはかると共に、同じ特性のモータを多数製作できる技術の確立を目指す。マイクロモータには、マイクロロボットおよびメッシュロボットのアクチュエータとして、十分な出力トルクをもつこと、位置制御ができること、多数のモータを製作しても安定して均一な特性をもつことが求められる。

なお、超音波モータについては、平成 28 年度委託業務開始時はサイズの目標値が、 $2\times 2\times 4\text{ mm}$ であったが、平成 28 年度のモータ試作結果を踏まえ、安定して均一な特性を維持するために、サイズの目標値を $3\times 3\times 3\text{ mm}$ に修正する。

2) マイクロロボットの開発

マイクロモータを 6 セット組み合わせて、6 自由度のマイクロロボットを試作開発する。製作の簡易化と安定化のため、専用のロボットケースにモータを取り付けるだけで、ロボットとしての機能を得るようにする。マイクロロボットには、メッシュロボットの要素として十分な出力トルクを持つこと、位置制御およびコンプライアンス制御ができること、多数のロボットを製作しても安定して均一な特性をもつことが求められる。

3) メッシュロボットの開発

複数台のマイクロロボットを並列に組み合わせることでメッシュ状の閉リンク構造の多自由度ロボット（以下、メッシュロボット）を開発する。メッシュロボットはコントローラを含め、携帯可能な大きさであること、任意の形状を再現できること、触覚／力覚提示に利用できることが求められる。目標とする仕様は、 $0\text{ N}\sim 5\text{ N}$ のレンジで、 0.01 N の精度で力覚提示ができること、表面粗さ 0 mm から 17 mm の凹凸を実現することである。

4) メッシュロボットによる触覚力覚提示

メッシュロボットによるコンプライアンス制御、力制御を行い、触覚／力覚提示の実験を行う。実証試験では、視覚情報とパワーアシストスーツのシステムと組み合わせて、3次元のVRによる触覚／力覚提示を行う。この結果よりメッシュロボットを実現するための最適なアプローチを検討し、これに基づく技術ロードマップを取りまとめる。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

1) マイクロ超音波モータの開発

a) マイクロ超音波モータの設計（一次試作）

①3×3×3 mm サイコロ型の回転1自由度の超音波モータの設計

超音波モータについては、委託業務開始時はサイズの目標値が、 $2 \times 2 \times 4$ mm であった。しかしながら、事前のモータ試作打合せを踏まえ、安定して均一な特性を維持するためには、サイズの目標値を $3 \times 3 \times 3$ mm に修正変更が必要と判断した。このサイズの圧電素子を用いた小型超音波モータの設計を行った。本モータはキューブ型の金属（ステータ）に貫通穴をあけ、軸（ロータ）を通した簡単な構造となっている。部品点数が少なく、小型化に適しているといえる。摩擦力を駆動力とする超音波モータに代表される圧電アクチュエータにおいては、回転体と振動体が適切な圧力をもって押し付けられていることが非常に重要である。常に一定した押付力を発生させるため、押付け機構を備えた新たな構造の小型超音波モータを設計製作した。ステータはテーパを有した軸穴をもち、回転軸は中央で分割され、テーパ形状をなしている。この軸を内部のバネによって、軸方向へ引き合い、テーパ部でステータと接触させる構造とした。バネの引張長さはバネ端部を支持するフックを通す穴の位置を変更することにより0.3 mm 刻みの4.3~5.2 mm の4段階に調節することが可能となっている。図1に製作した一次試作モータを示す。3 mm 角ではあるが、その微小さがわかる。

さらに、製作の簡易化と安定化のため、モータはできる限り簡単な構造とした（最終的な構造は後述の図24を参照）。ステータとロータ他僅かな部品と調節機構を持つ簡易で組立も容易な構造である。

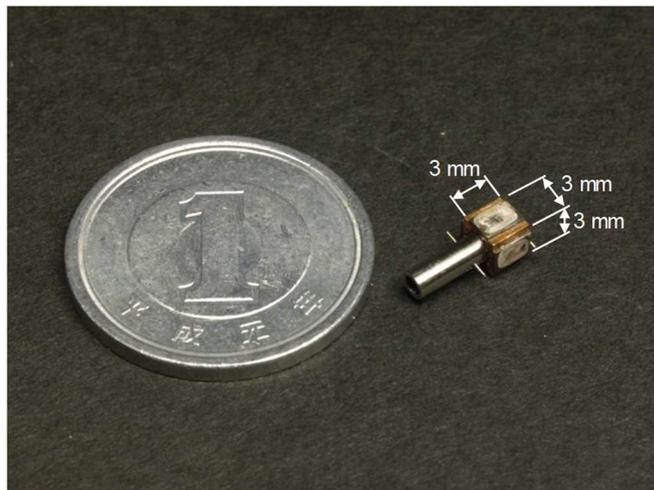


図1 小型超音波モータ

②小型減速機の設計

モータの試作と出力トルク向上に並行してマイクロアームを開発する。モータのステータ部には超小型の歯車機構を採用し、出力トルクの増大をはかる。このため、本研究ではステータ部に歯車機構を組み込むことを当初計画していた。しかしながら、ロータ軸回りとステータ内面の歯車加工は高精度の超微細加工が要求され現実的には極めて困難であった。そこで、ここでは遊星歯車を用いた超小型減速機（減速比 64）の設計と製作を行い、モータの外部に取付けることとした。減速機の外観を図 2 に示す。減速機単体で行った試験では入力軸に 0.3 mNm 相当の錘を吊り下げ、出力軸側で 10 mNm 相当の錘を巻き上げることに成功している。

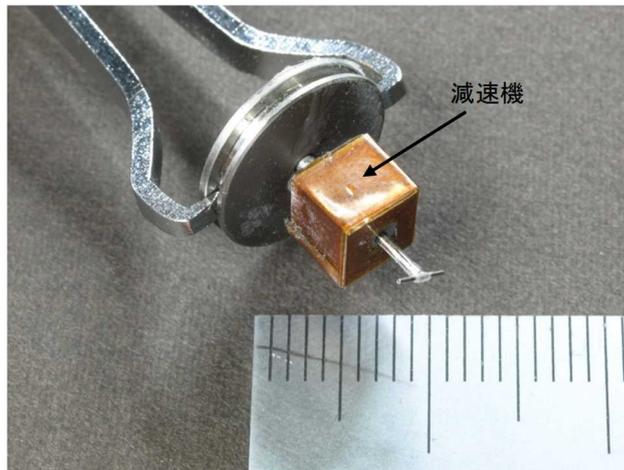


図 2 減速機の外観

③回転角の検出について

マイクロモータの位置検出のために、図 3 に示すようなホール素子による回転角検出回路を製作した。使用した回転磁気角度センサの仕様を表 1 に示す。計画では、磁石は直接モータ軸に着磁するとした。しかしながら、本研究では製作の容易さを重視し、着磁した薄膜状ゴムをモータ軸に巻き付けることで等価的な機能と構造を持たせた。センサは一回転で NS を一回ずつ繰り返す。即ち、一回転で正弦波状の出力を得る。これを 60 分割することで 6°刻みの位置検出ができる。減速機を介すことにより 0.1° 程度の位置精度を得ることができる。製作の簡易化と安定化を実現した構造であるため、モータを簡単な構造とする目標が達成できた。

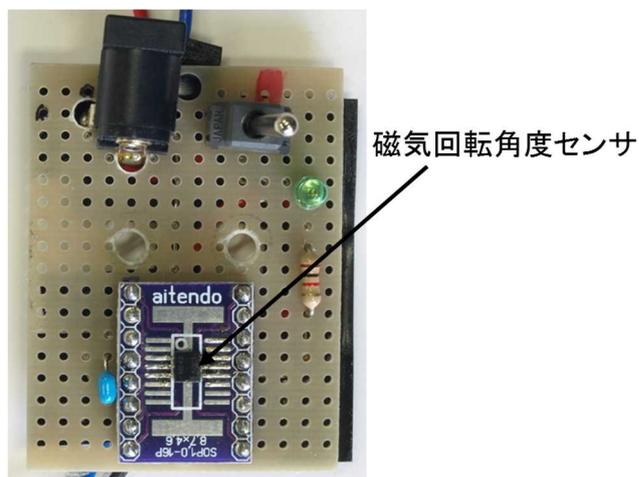


図 3 測定回路（基礎実験のためのもの。実際には、中央のホールセンサのみ独立して利用。）

表 1 回転磁気角度センサの仕様

メーカー	旭化成エレクトロニクス
型番	EM3242
角度分解能	0.36° (10 bit)
温度ドリフト	±1.0°
AD 変換周期	40 μs (25 kHz)
センサ寸法	3.6×3.0×0.95 mm

b) マイクロ超音波モータの試作（一次試作）

① 圧電素子の貼り付け方法について

・ 貼り付け治具の製作

超音波モータのステータには、駆動源となる圧電素子を貼り付ける。圧電素子の貼り付けは極めて重要である。200 kHz 以上の交番振動を受け、大きな出力を生み出す圧電素子とステータ金属との接着は極めて難しい。特殊な接着材とノウハウが必要である。このサイズの圧電素子を貼り付ける技術は本研究室以外にはなく、治具の開発から行った。

まずは、一辺 3 mm の立方体形状のステータに対して圧電素子を位置決めし、接着治具の製作を行った。治具は主にステータと圧電素子の位置決めと保持を行う固定具および押付具により構成されている。図 4 に実際の貼り付け治具を示す。押付具はバネを介して力を発生させる構造となっており、バネを任意の長さまで押し縮めることで加圧する。1 回の工程で対向する 2 面の圧電素子を貼り付け、これを 2 度行い計 4 枚の圧電素子を接着する（工夫すれば同時に 4 枚貼ることができるが接着膜の品質が安定しない）。



(a) 固定具



(b) 押付具

図 4 貼り付け治具

・ 接着剤

圧電素子は導電性の接着剤を用いてステータ各面に貼り付けられている。使用した接着剤は従来の超音波モータの製作にも使用してきたものである。塗布作業を行った後、恒温器に入れて 150°C で 30 分の条件で硬化させる。

②一次試作モータの性能試験

・出力トルクの変化による環境

減速機とモータを接続し、錘の巻き上げによる出力トルクの評価を行った。現状では半径 5 mm のプーリで 30 g の錘の巻き上げに成功しているため、最低でも 1.47 mNm の出力トルクを確認している。目標としている最大トルクには到達していないが、後述する通り、押付力を増大させることと、印加電圧を 250 Vp-p とすることにより 10 mNm を達成できる見込みである。

・回転速度の制御パラメータによる特性

(1) 周波数－回転速度特性

印加電圧の周波数を変化させたときの回転速度の変化を測定した。なお、印加電圧は 130 Vp-p とし、位相差 Φ は 90° とした。測定の結果を図 5 に示す。この実験に使用したモータは、インピーダンスアナライザによる測定では、共振周波数が 248.0 kHz から 248.3 kHz 付近にあるという結果を得ており、実測による結果と良く一致していることを確認した。

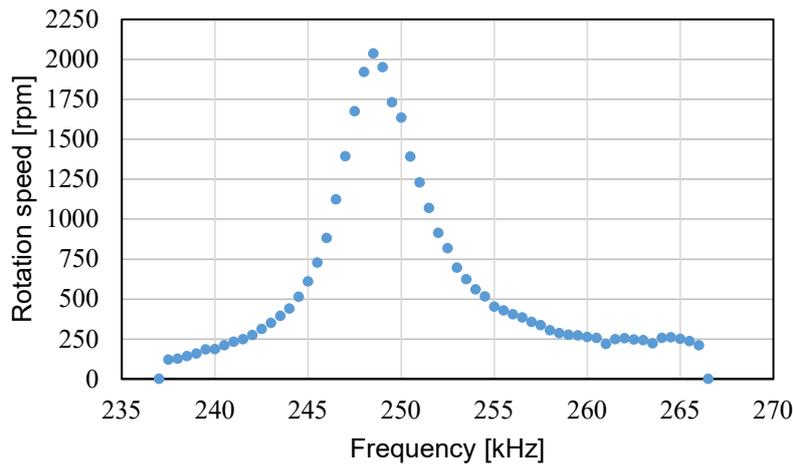


図 5 周波数－回転速度特性

(2) 位相差－回転速度特性

印加電圧の位相差（対向する一組の圧電素子同士の位相差を 180° に固定したときの隣り合う圧電素子との位相差）を変えたときの回転速度の変化を測定した。駆動周波数は周波数回転速度特性の測定において最も大きい回転速度を記録した周波数とし、印加電圧は共通の 130 Vp-p とした。

図 6 に測定結果を示す。過去の超音波モータに関する実験結果と同様の正弦関数状の特性である。理想的な条件においては最大の回転速度は電圧の位相差が $\pm 90^\circ$ のときに得られるはずであるが、結果にはずれが生じている。原因として圧電素子の貼り付けによる位置の誤差と回路内の位相のずれが考えられる。ステータ上の進行波は位置的な位相差と時間差がともに $\pi/2$ である定在波が合成されることにより発生させる。実際のステータでは圧電素子の張り付け位置がわずかにずれており、定在波の位置的な位相差が厳密には $\pi/2$ ではないため、図 6 のように実験結果が正弦関数からずれたとも考えられる。

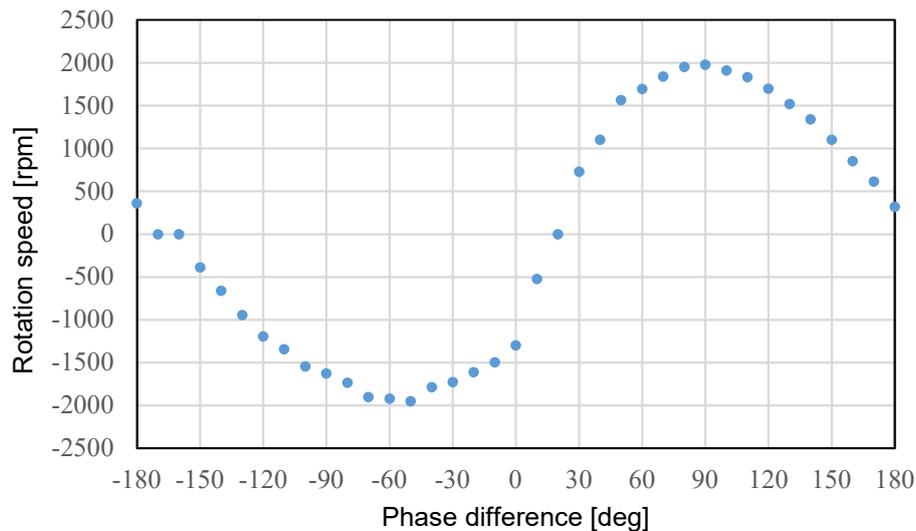


図 6 位相差一回転速度特性

(3) 印加電圧-回転速度特性

印加電圧の変化に伴う回転速度の変化を測定した。駆動周波数は周波数回転速度特性の測定において最も大きい回転速度を記録した周波数とし、位相差 Φ は共通の 90° とした。実験結果を図 7 に示す。電圧の増加と共に回転速度も増加することが分かる。今回の測定では 170 Vp-p から飽和の傾向が見て取れる。

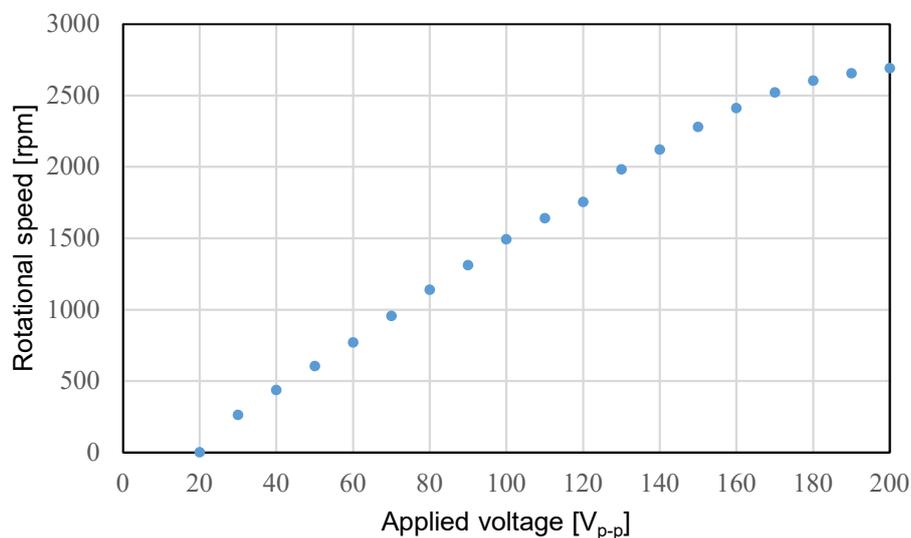


図 7 印加電圧回転速度特性

・最適駆動周波数の検討

(1) 有限要素法解析による共振周波数検討

小型超音波モータは回転の振動モードを生み出す固有振動数（共振周波数）において駆動する。ステータの最適な固有振動（駆動に適した振動モード）を求めるために、有限要素法による解析を行った。解析には CAD ソフトウェアの「SOLIDWORKS」付属の有限要素法を使用した。図 8 に解析の結

果から回転を生じると予想されるモードを示す。その結果、図 8 のような固有振動が内面に持つロータを良く駆動できることが分かった。

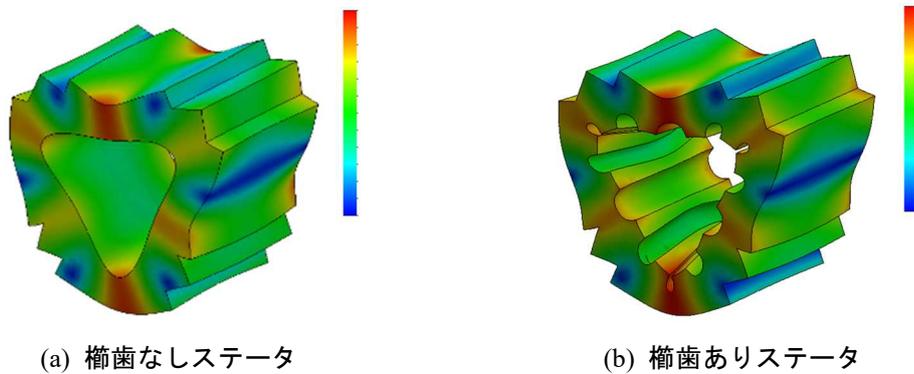


図 8 有限要素法による解析結果

(2) インピーダンスアナライザによる共振周波数の測定

前節において解析的に求めた共振周波数を元に、インピーダンスアナライザを用いて実際に製作した小型超音波モータのインピーダンスを測定し共振周波数を求めた。インピーダンスが極小となる周波数が共振周波数である。有限要素法による解析結果から回転のモードを生じると予想された周波数近傍におけるインピーダンスの極小点が各面に関する圧電素子の共振周波数を示す。

(3) 最適駆動周波数の追従方法

ステータの共振周波数付近（すこし高い周波数）でモータを駆動するが、環境の変化（温度、押付力、接触位置の移動なそ）により共振周波数が変化する。駆動中は常に正しい周波数にチューニングする必要がある。本開発では圧電素子のフィードバック相を用いた追従方法を採用した。即ち、4 側面の圧電素子のうち、電圧を印加し変形を発生させる相（通常相）と、ステータの変形によって発生する電圧を取り出してフィードバックする相（フィードバック相）の 2 相を設ける（図 9）。圧電素子に最大の変形が生じているとき、フィードバックされる電圧が最も大きくなることから共振周波数の追従を行う。

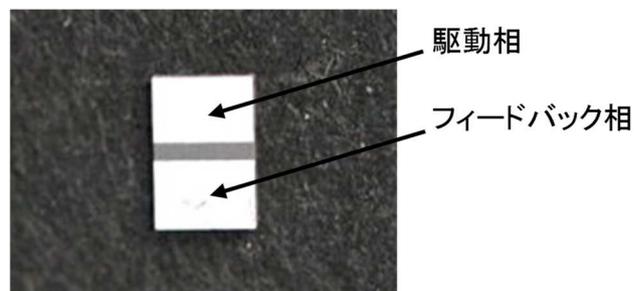


図 9 2 相を有する圧電素子

c) マイクロ超音波モータの評価と改良

①概要

試作したマイクロ超音波モータに対して出力トルクと回転速度に関する性能評価と仕様達成度の確認および安定して高出力トルクの振動モードについて検討を行ったが、まだ十分な出力トルクを得るに至っていない。そのため、一次試作モータについては、キー技術となるロータとステータの押付機構の改良が必要である。

②改良について

・使用する圧電素子の検討

圧電素子の専門メーカーの二種類の圧電素子を使用して製作したステータを比較した。二種類とも進行波型超音波モータにおいて一般的に使用されている圧電素子であり、本研究におけるモータに対しても適している。メーカーの提示している特性が両者とも非常に近いため、今後の製作において使用する圧電素子を最終決定するため、性能を比較した。結果として両者に大きな差は見られなかった。今後は納期などを考慮して利用を進める。

・櫛歯による駆動性能の向上について

貫通穴面の櫛歯の有無によるモータ性能の比較を行った。これまでの進行波型超音波モータは櫛歯形状によりステータの剛性を高めることなく、厚みを増加させステータとロータの接触部の楕円運動による振幅を増大させている。しかし、今回は初めてキューブ型のステータに対するモータの櫛歯による効果を検証した。櫛歯あり、櫛歯なしのそれぞれのステータにおける周波数回転速度特性を測定し比較を行った。図 10 に測定結果を示す。櫛歯ありのステータと比べ櫛歯なしのステータは、共振周波数における最大回転速度が低く、また、駆動できる周波数のすそ野が狭くなっている。本モータにおいても櫛歯による進行波の増幅効果を確認できた。また、最高回転数が 200 rpm 強あり、減速機を介しても 30 rpm 強となるため当初の目標を達成できた。

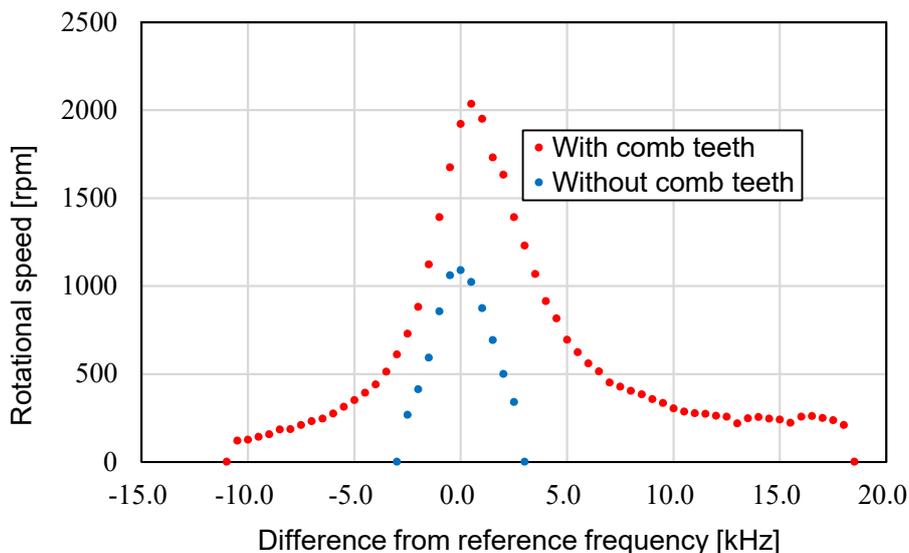


図 10 櫛歯の有無による周波数回転速度特性の比較

・バネによるシャフト押付力の向上について

シャフト内のバネの引張長さによりロータ・ステータ間の押付力を変化させ、回転速度の変化を測定した。摩擦により駆動する超音波モータにおいて回転体と振動体との押付け状態はモータ特性に大きく影響する要素である。ここを調整して目標とする特性にもっていく。駆動周波数はステータの共振周波数、位相差 Φ は 90° 、印加電圧は 130 Vp-p と設定した。

実験結果を図 11 に示す。回転数が 2000 rpm 程度とかなり速く、押付が足りないことが分かる。通常であれば押付力の増加と共に回転速度は低下すると予想されるが、押付力の変化に対してほぼ一定である。原因として、現状の押付力の範囲では押付力が不十分であり、摩擦力に大きな変化を発生しなかったためであると考えられる。二次試作では、より強い押付力を加えられるようにモータの機構とバネを変更する。

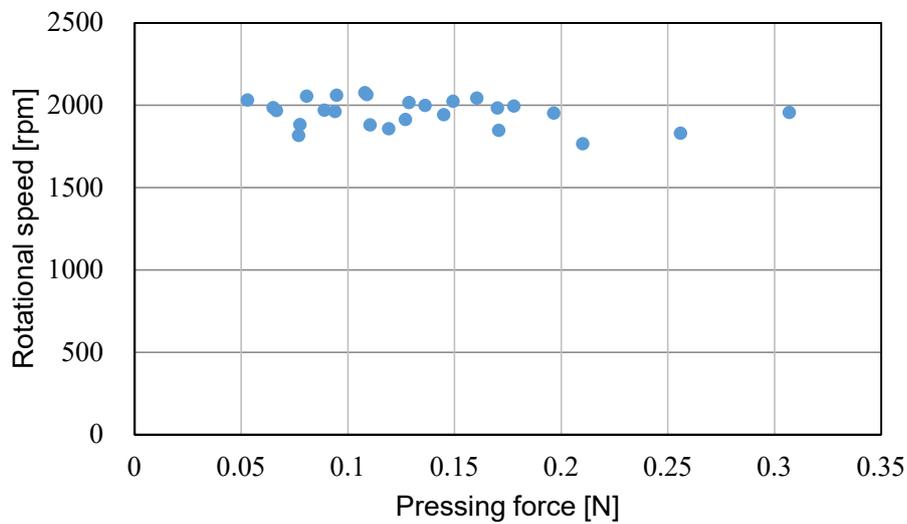


図 11 押付力-回転速度特性

d) マイクロ超音波モータ

図 12 に作製した一次試作のマイクロ超音波モータを示す。圧電素子の貼り付け条件を決めるため多数のモータ試作を行った。

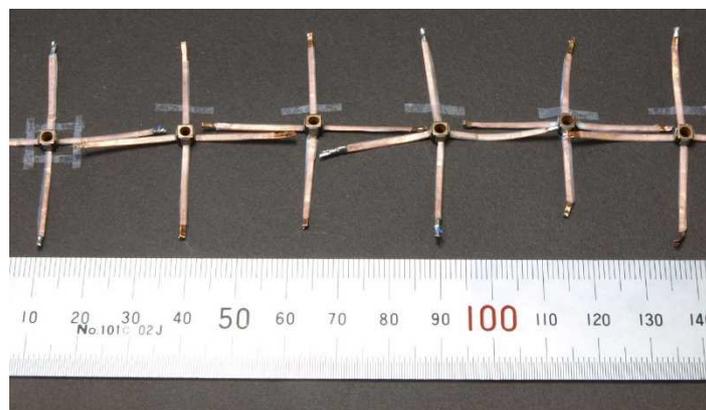


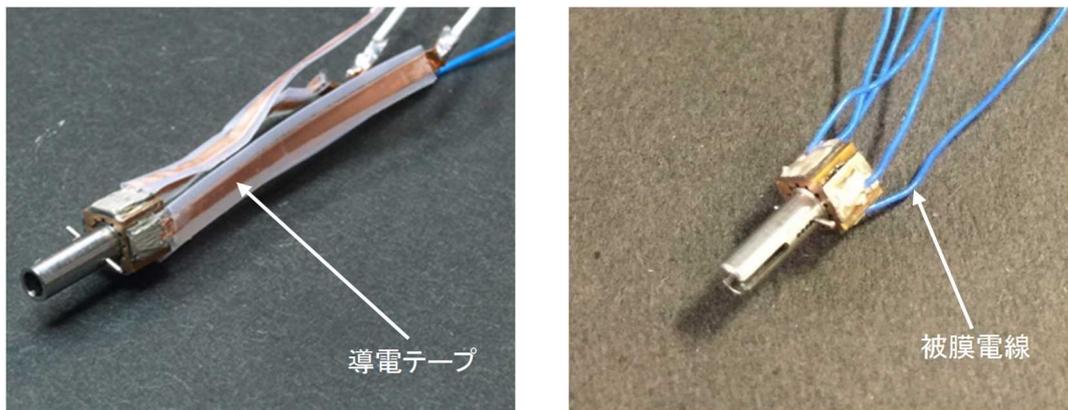
図 12 作製したマイクロ超音波モータ

①改良マイクロ超音波モータの製作

- ・マイクロ超音波モータの改良、修正

- ・電源線の改良

これまでも電源線は柔軟性の低い導電テープを応用したものであったが、組み立てを容易化することとロボットにする際の取り回し向上を目的とし、電源線を径の細い皮膜付きの電線とした。図 13 に一次試作初期のモータ外観および改良したモータ外観を示す。モータ本体はロボット用のユニットに取り付ける際、ロボット用のその他のパーツと共に一枚の板に取り付けることが可能となった。



(a) 一次試作モータ

(b) 一次試作改良モータ

図 13 新旧モータ外観

- ・ロータ形状の修正

一次試作の課題として、押付力の増加に対する各種特性の変化が顕著ではないとの問題があった。この原因として、加工誤差によりロータ同士が先端で接触していることで押付力が振動しているステータに加わっていないことが予想された。そこで、改良版においてはロータ形状の修正を行う。ロータ間の間隙を増加させた（加工精度も上げた）ほか、端部エッジがステータと接触するリスクをより軽減するため、互いの先端部分が内側に入り込む形で回転が伝わる形状とした。この修正により押付力の変化に対する各種特性の変化が測定可能となった。特性の測定結果については後述する。ロータもステータも非常に小さな部品であり、高精度の加工を指示しても実現できない場合が多い。そのため、加工誤差があったとしても確実に両者が接触する機構に変更する必要がある。これを二次試作で実現する。

②押付力に対する各種特性の測定

- ・実験装置

これまで利用した回転速度測定装置に加え、トルク特性のための実験装置を製作した。製作した測定装置を図 14 に示す。測定装置には回転軸が設けてあり、小型超音波モータの回転軸の先端と接続する。測定装置の回転軸の先端に軸と直交する穴があいており、穴から糸を垂らすことができる。糸を垂らした状態で回転軸を回転させることで糸を巻き上げられる構造である。糸の先端に重りを取り付け、持ち上げられた重さによってトルクを算出する。測定装置の回転軸の直径は 2 mm である。

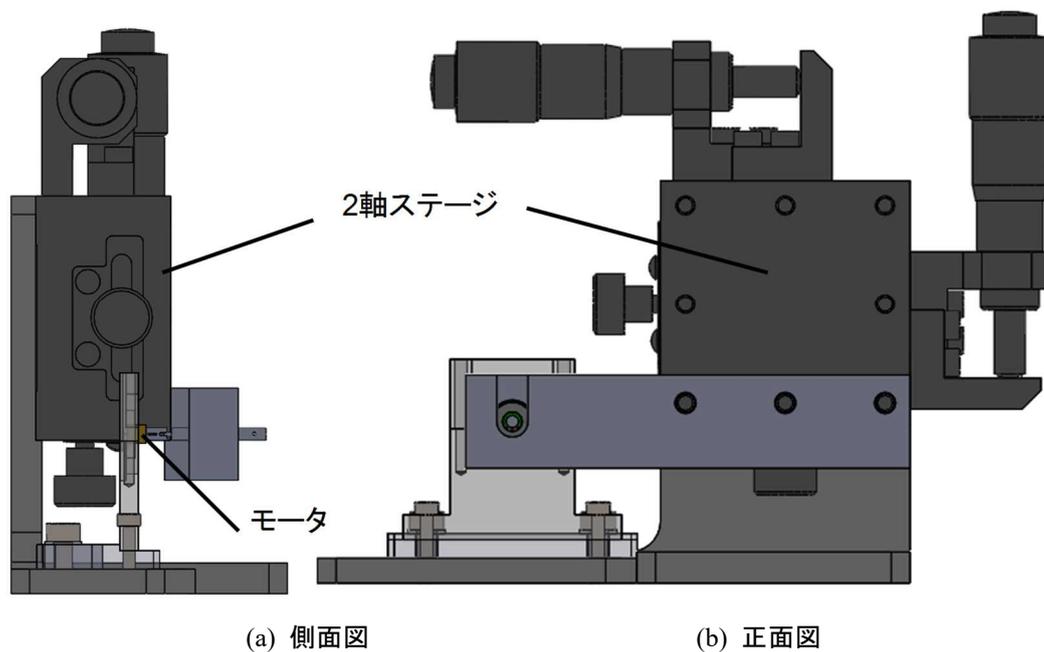


図 14 トルク測定装置

・ 押付力ー回転速度特性

押付力ー回転速度特性を調べるため、次の方法で実験を行った。小型超音波モータ内のバネの引張長さを変化させ、ステータと回転軸間の押付力を変化させる。それぞれの押付力について印加電圧の周波数を変化させ、回転速度の変化を測定した。バネの引張力は 41 mN から 89 mN まで 12 mN 間隔で 5 段階に変化させた。印加電圧の周波数はインピーダンスの測定結果から求めた R3 モードを生じる周波数を基準に 0.2 kHz ずつ変化させ、モータの駆動するすべての周波数において回転速度を測定した。摩擦により駆動する超音波モータにおいて回転体と振動体との押付け状態は性能に大きく影響する要素であり、最も効率良く回転を実現する適切な値が存在する。印加電圧は 200 Vp-p、位相差 Φ は 90° と設定した。

実験結果を図 15 に示す。モータが正常に組み立てられていれば、押付力の増加と共に回転速度は低下する。この結果より、押付力が増加すると回転速度が減少する傾向が見られている。従って、本実験におけるステータと回転軸間の押付力は設計通りに機能していると考えられる。また、インピーダンスアナライザの測定で得られた共振周波数とほぼ同じ値の周波数において回転速度が最大となっている。押付力を増加させるとわずかに共振周波数も増加する傾向が見られた。これもモータ内のバネの張力が増加することにより、モータの共振周波数が増加しているためであると考えられる。押付機構が機能していることが分かった。

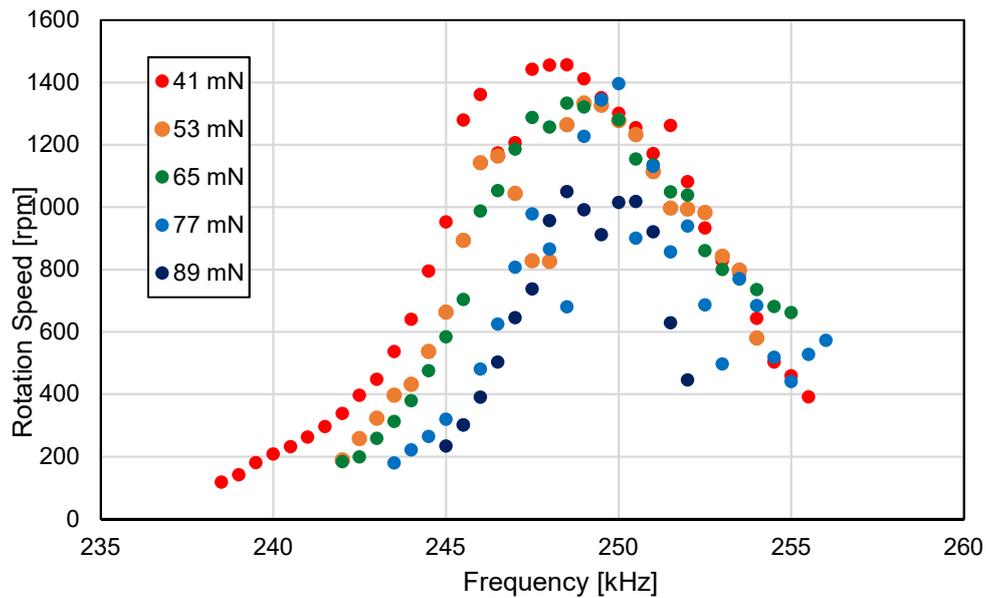


図 15 押付力回転速度特性

・ 押付力トルク特性

押付力トルク特性を調べるため前節と同様の方法で押付力と周波数を変化させ、それぞれのトルクを測定した。糸で持ち上げる重りは 250 mg ずつ増やした。重力加速度を 9.80665 m/s^2 としてトルクを算出した。実験結果を図 16 に示す。過去の進行波型超音波モータにおいて押付力ー回転速度特性を測定した実験では、押付力の増加に従いトルクが増加する。押付力を余り大きくすると、逆に出力トルクが減少する。これは接触面で進行波が生成できずに、固有振動のモードが変化したためである。さらに大きな出力トルクを得るためには、押付面での表面改質を行う。即ち、ロータの形状と材料を変えて、高い押付力でも進行波が生成され、摩擦駆動ができるように改良する必要がある。

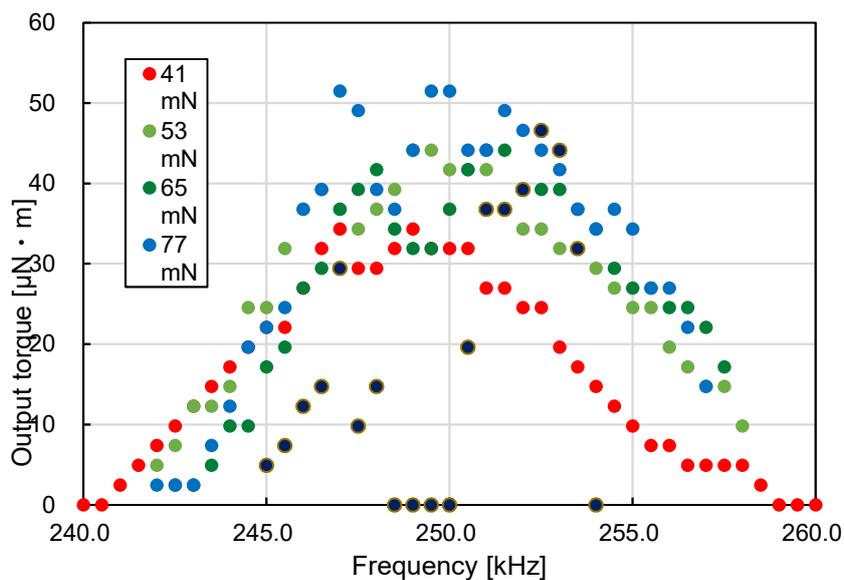


図 16 押付力トルク特性

③FB 相によるリアルタイム共振周波数の取得方法

・概要

超音波モータを制御する際は回転速度が最大となる共振周波数を特定する必要がある。現状では固有値解析によりおおよその共振周波数を特定し、その周波数を元にインピーダンスアナライザにより実際の共振周波数を測定している。しかし、モータ本体には4つの圧電素子があり、それぞれの圧電素子のインピーダンスの測定から得られる共振周波数の値は完全に一致していない。また、実際に周波数回転速度特性を測定すると、最大回転速度を記録する周波数もインピーダンスの測定から求めた周波数の値と違っている。同じ小型超音波モータでも、圧電素子の貼り付け状態の微妙な差などの個体差などがあるため、全ての小型超音波モータの共振周波数が全く同じ値となることも難しい。このため、現状の小型超音波モータにおいては、回転速度が最大となる周波数である実際の共振周波数を求める方法としては、周波数-回転速度特性を直接測定する以外にない。

モータの制御を行う際は、周波数を変化させて制御するため、モータの共振周波数を明らかにする必要がある。しかし、新しいモータを使用するたびに周波数-回転速度特性の実験を行って共振周波数を特定する方法は煩わしく時間がかかるため、実用を考えると現実的ではないと考えられる。また、圧電素子は電圧を印加し続けると発熱し、この発熱により共振周波数が変化してしまう。このため、モータ使用中にも共振周波数の特定をしなければならない。このことを考慮すると、回転速度の実測による共振周波数の特定はさらに実用的ではないと考えられる。

このため、回転速度の実測以外の共振周波数の特定方法を確立する必要がある。特定方法としては、煩わしい作業を必要とせず、時間をかける必要もなく、モータ使用中にも行うことが可能な特定方法が望ましい。上述の条件を満たす共振周波数の特定方法として、圧電素子の圧電効果を利用した共振周波数の特定方法を考えた。この方法はこれまでに開発してきた球面超音波モータのステータに対して用いている方法であり、本研究の小型超音波モータに対しても適用できる。

・回転速度特性測定

FB相を設けた小型超音波モータの回転速度を測定した。図17には周波数-回転速度特性を示し、図18には電圧-回転速度特性を示す。

図17より、FB型において回転速度がピークとなる周波数は246.25 kHzとなることが分かる。通常型とFB型の共振周波数が違っているが、これはFB型においてFB相付き圧電素子によって振動子として形状が変わってしまったことや、圧電素子の貼り付け位置や圧電素子と金属の間の接着剤の層の厚みの違いによるステータ自体の形状に違いができてしまったためだと考えられる。

また図17から、最高回転速度を含め全体的な回転速度が通常型に比べFB型が小さくなっている。これはFB相の圧電素子が貼り付けられている面において、約半分の大きさの圧電素子によって振動を引き起こしていることによる影響だと考えられる。図18においても全体的にFB型の回転数が低い、これも上記と同じ理由が考えられる。FB型のモータにおいて回転数の飽和が見られないのは、振動が小さく200 V_{p-p}においても圧電素子の変位量が飽和しなかったためだと考えられる。

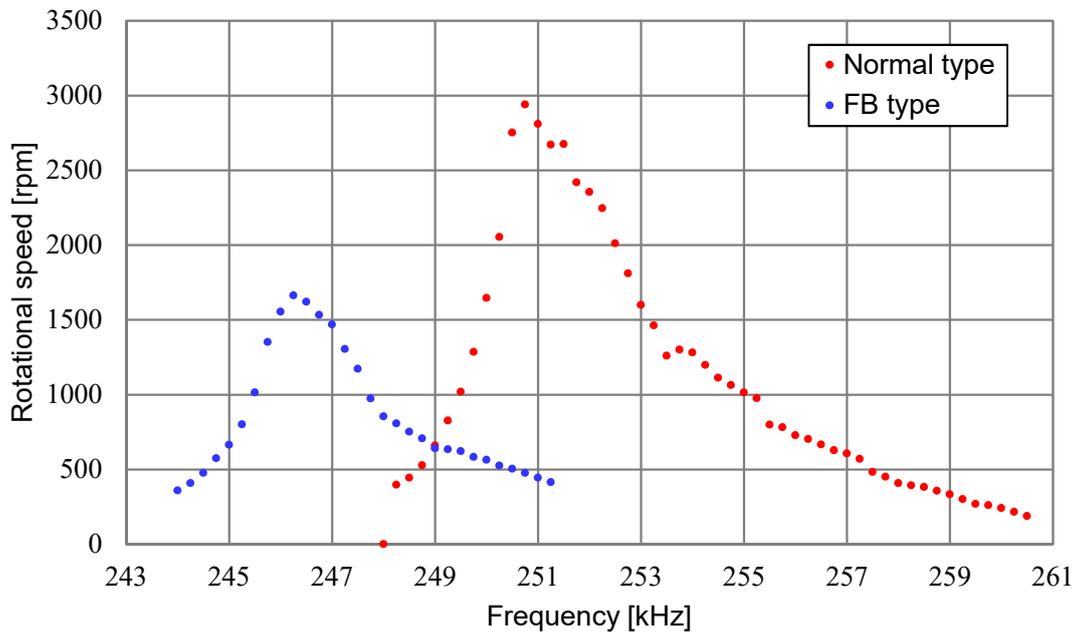


図 17 周波数一回転速度特性

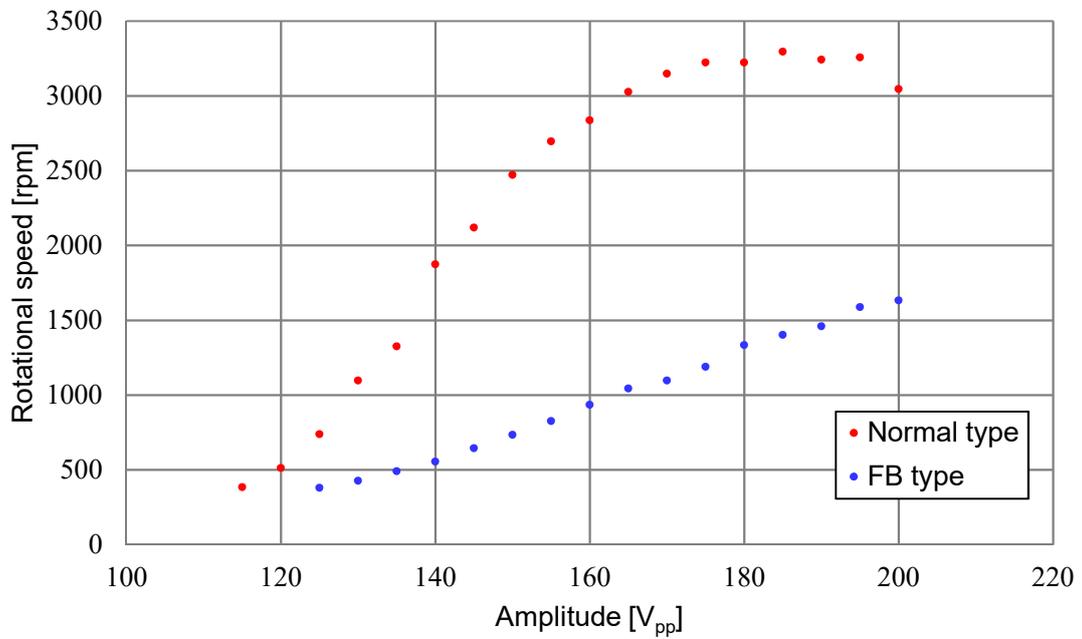


図 18 電圧一回転速度特性

・FB 相電圧による共振周波数の特定

ステータにロータを挿入した状態、挿入しない状態において各周波数における FB 相の電圧を測定した。周波数に対する電圧の最大値をまとめたグラフを図 19 に示す。ロータを挿入して測定した FB 相の電圧の最大値の変化傾向が軸を挿入しない時と同じ変化傾向を示している。しかし、共振周波数を特定するために重要となる FB 電圧の最大値がピークとなる周波数近傍に注目すると、軸なしの状態では、ピークが乱れていることが分かる。軸を挿入したことによる波形の乱れの原因として、振動時にステータと軸が接触することで圧電素子の振動が阻害されることや、接触時に軸から受けた応力のために圧電効果により圧電素子から発生する電圧が乱れたことが原因として考えられる。いずれにしても、実際にはロータを挿入した状態でモータを利用するため、FB 信号が安定していることは重要である。本実験の方法では軸を挿入した状態で共振周波数を特定することは難しいと考えられる。解決策としては FB 電圧の波形に周期性が見られるまで測定時間を延ばすか、電気的なフィルターをかけ FB 電圧の波形を整形するなどの方法が考えられる。モータの駆動回路にはフィルターをかけて FB 信号を整形する。

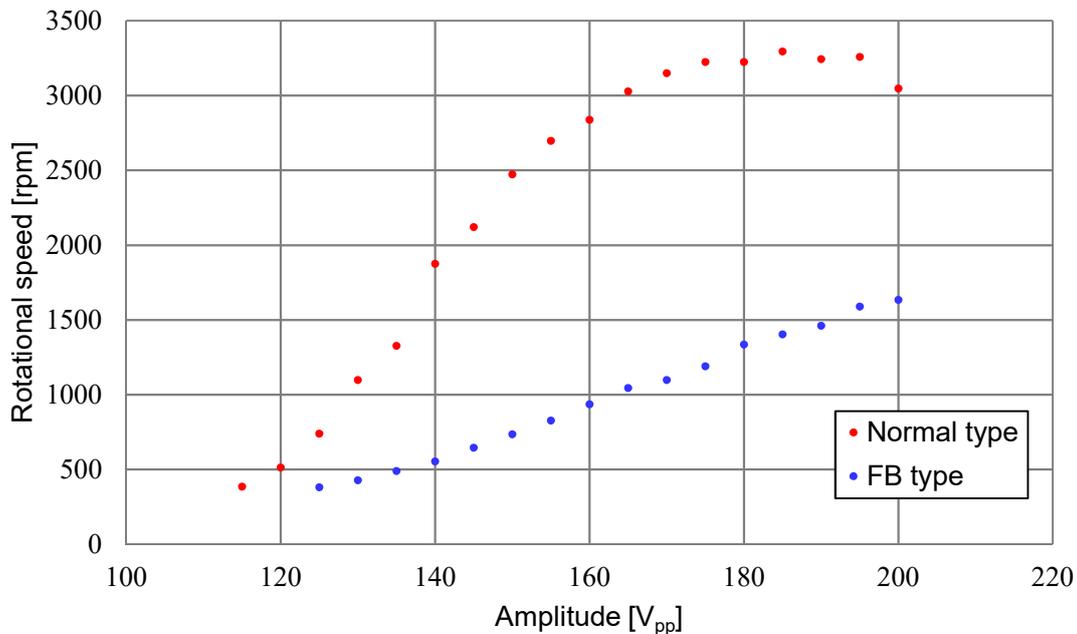


図 19 ロータの有無による FB 相電圧の比較

e) マイクロモータの改良（二次試作）

一次試作では、モータの原理の確認と基本性能の確認が主な目的であった。そもそもこのサイズについても超音波モータはこれまで無かったため、貼り付け治具の試作、圧電素子貼り付けノウハウの取得から始まった。一次試作モータでは、共振周波数が 248.0 kHz、最高回転数が 2600 rpm (200 V_{p-p} 印加時)、最大出力トルクが 20 μNm ほどであった。モータとして機能することや制御性（位相と周波数による回転速度制御）の確認はできたが、十分な出力トルクは得られなかった。目標の出力トルクに及ばない原因は、ロータとステータの接触状態にある。即ち、ロータ外面とステータ内面のどの部分で接触し、摩擦力を伝達しているかが安定しないことである。これは加工精度によるものである。

ロータとステータのテーパを高精度で実現し、両者を隙間無く接触させることは、このサイズの加工精度では困難である。この解決として、二次試作ではロータの接触部を球状として接触部を確定した（球の加工精度は極めて高く、直径で優に 1/500 mm 程度が実現できる）。さらに、ホール内面の進行波の振幅は数 μm と考えられるので、ロータの押し付け時の表面の弾性率も重要となる。このため、ロータ接触部品をステンレスと樹脂で作製した。硬いステンレスは波頭の先端で接触するが、樹脂は弾性率が低いため進行波の 40%程度までがロータに取り込まれると思われる（強い押し付けでは進行波の 100%が侵入することになるが、これでは駆動できない）。これにより、実験では、ロータとステータの接触状態が大きく改善され、400 μNm 程度の出力を得た。最高回転数は 2000 rpm である。一次試作より一桁大きいトルクである。現実装置では、さらに大きいトルクを得ることができなかったが、これは樹脂では表面硬さが十分では無いため、押し付けを大きくすると進行波がすべてロータに埋没するためである（駆動できない）。これを解決するためには、樹脂ロータの表面に柔らかい金属を蒸着して表面改質を行うことが考えられる。回転数が 100 rpm に低下するように押し付けを大きくすると、出力トルクは 8 mNm となる。計画当初、メッシュロボットに用いるモータの出力トルクは大きめに見積もって 10 mNm を想定していた。これよりも推定値は 20%程度低い値であるが、メッシュロボットを定格駆動するには十分なトルクであると言える。また、2.5 mm サイズの圧電素子に高電圧をかけた場合の出力として、これが限界の出力トルクと思われる。しかしながら、ロータとステータの接触面の改質を行うことでさらに高い出力トルクも期待できる。

3 mm 角のモータの速度-トルク特性をもとに、1 mm 角のモータの特性を予測する。出力トルク及び回転速度は、この領域では形状寸法に線形に影響するとみなすと、トルクは 1/3 倍で約 130 μNm 、回転速度は 3 倍で 6000 rpm となる。これより理想的な条件で目標回転速度 200 rpm まで押し付けの調整により減速-増トルク調整を行ったとすると、1 mm 角モータの出力トルクは 3.9 mNm となる。さらに減速調整し 30 rpm 程度にすると、24 mNm 程度と目標値 10 mNm よりも高くなる。さらに、現在は電圧増幅器の限界のため 300 Vp-p を基準としてきたが、モータの出力は電圧の増加に伴い線形に増加するため、750 Vp-p での運用が可能となれば目標としている出力トルクより遙かに高い 50 mNm が実現可能であると推測される。

次に、二次試作モータの立ち上がり特性と空間安定性（応答性）の実験を行った。ステップ応答より機械的時定数を測定したところ 0.4 ms であった。また、 $\pm 5^\circ$ の角度で正逆転させる運動を印加したところ、477 Hz で -3 dB の低下であった（無負荷の状態、電圧 300 Vp-p）。

モータの位置制御については、本モータの応答が極めて速いため、性能を活かした制御系を組むことができなかった。そこで、参考に、時定数が一桁大きい $\phi 8$ mm のステータを使った実験を行った。印可電圧 200 Vp-p、PI 制御で 45° 回転させた実験では、整定時間 70 msec、位置誤差 0.5° であった。これより推測するに、本モータでは印可電圧 300 Vp-p、PI 制御で 45° 回転させた場合、整定時間は数 msec、位置誤差は 0.5° 程度以下と予想される（なお、位置精度をあげるのはモータ自体の性能ではなく、位置検出機の精度と制御系のサイクルタイムである）。

また、コンプライアンス制御についても本モータの応答が極めて速いため性能を活かした制御系を組むことができなかったが、同じく $\phi 8$ mm のステータを使った実験を参考に行った。コンプライアンスを持たせる（単位角度あたり発生する回転バネ力に相当）には、3つの方法がある。電圧の制御、周波数の制御、位相の制御である。ここでは最も安定した制御ができる周波数の制御実験を行った。即ち、印可周波数を共振周波数から 4.0 kHz 増加させることでほぼ線形で発生力を変化させることが

できる。コンプライアンスが大きい場合には高い周波数を、コンプライアンスが小さい場合には共振点付近の周波数を使うことで、コンプライアンス制御を行うことができる。周波数は短時間に変化させることができるため有効な方法である。

これまで述べたように、モータの試作・評価を通じて性能の向上をはかってきた。さらに、メッシュロボットに应用する場合、多数のモータを製作しても安定して均一な特性を持つことが求められる。これまでに述べたように、モータの簡単な構造、圧電素子の貼り付け治具の利用と温度コントロールによる貼付安定性、その他周辺技術（電極の貼り付けや線材の配置）とノウハウがほぼ確立している。実際に一度に 20 個のステータを同時に作ってきたが、それぞれの共振周波数のずれは 20~30 Hz 程度である。これはドライバーの最適駆動周波数の自動調整ができる範囲である。このことより、多数のモータを均一の特性を持たせて量産できる技術とノウハウが取得できた。

これよりマイクロモータの開発はほぼ目標を達成することができた。更なる向上も期待できる。単にモータだけではなく、駆動回路の試作も成功して、環境の変化による最適駆動周波数の追従動作も問題なくできることを確認した。

2) マイクロロボットの開発

(1) マイクロロボット用モータユニットの設計製作

小型超音波モータ、減速機を含むモータユニットを作製した。図 20 に製作したモータユニットの外観を示す。製作の簡易化と安定化のためにモータは可能な限り簡単な構造とし、以下のようにユニット化した。即ち、微小なアクリル板の端に 3 mm 角のモータを支持する。このとき、ステータの振動を阻害しないように振動の節近傍で支持する。減速機はアクリル材の中心に配する。板には設置箇所を示す切り欠きがあり、設置場所が明示されている。ただし、モータ軸と減速機の入力軸の接続は、軸どうしの一直線性を確保することは精度上困難であるため、継ぎ手を用いている。同じく減速機の出軸も継ぎ手を用いて滑り軸受けに接続されている。このようにすることで、モータや減速機への軸方向以外への反力を防ぐことができる。また、複数製作しても安定して駆動できるため、マイクロロボットの安定性に寄与する。最終的にはモータの高トルク化を行い、減速機が必要なくなり、さらに微小なユニットとなる。さらに、接続部が小さく接続部をヒンジ機構とすることが難しいと判断したため、モータユニット同士の接続はピンによる接続とした。これによりユニット同士の着脱も容易となった。モータ支持部はモータの実験装置で使ったモータ固定装置をユニット用に小型化した構造となっている。これは、モータの各面とは約 0.5×0.5 mm の面積を有する接触部 2 か所で接している構造であり、振動をほとんど阻害しない。このためモータ単体の実験時と同等の性能がユニット取り付け時にも得られる。

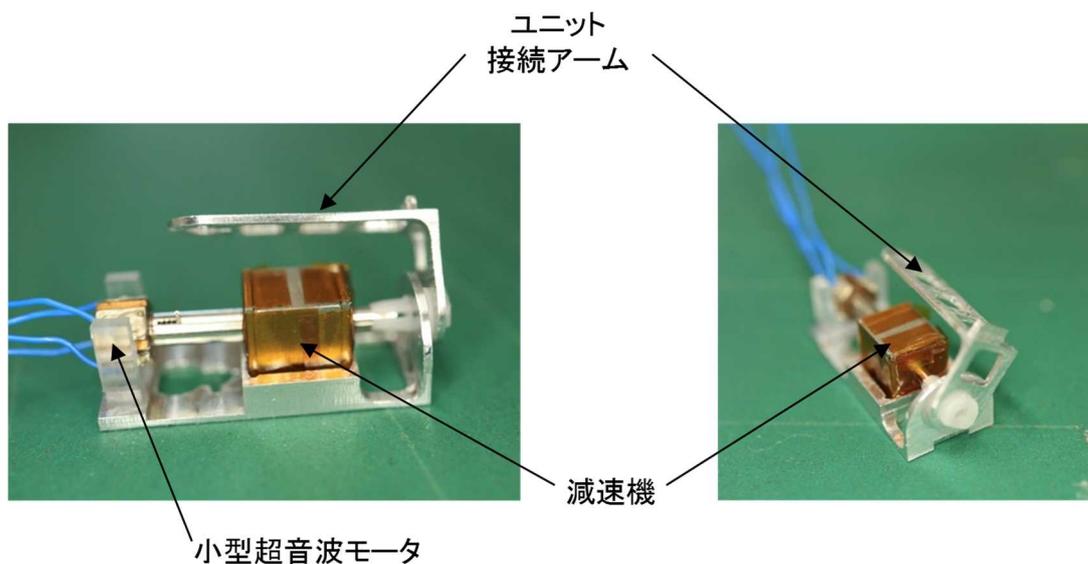


図 20 モータユニットの外観

(2) 3軸マイクロロボットの製作および動作試験

当初、図 21 左側に示す 6 軸マイクロロボットを試作する計画であったが、実際には予算と時間の制約があったため、3 軸マイクロロボットの作製を試みた。6 自由度逆運動学を解き、その結果を用いて軌道生成し、3 自由度分のモータを駆動することとした。6 自由度ロボットのサイクルタイムは 10 ms 弱と考えられる。目標とする 50 ms には十分なサイクルタイムと思われる。実験で用いたロボットは 3 自由度であるが、逆運動学は 6 自由度で行っており、各モータ駆動は同時に行っているため、6 自由度ロボットの制御も問題なくできることが考えられる。

そこでここでは、製作したモータユニットを組み合わせ、3 軸マイクロロボットを作製した。図 21 右側に 3 軸マイクロロボットの外観を示す。組み立てた状態における各軸の駆動が確認できた。

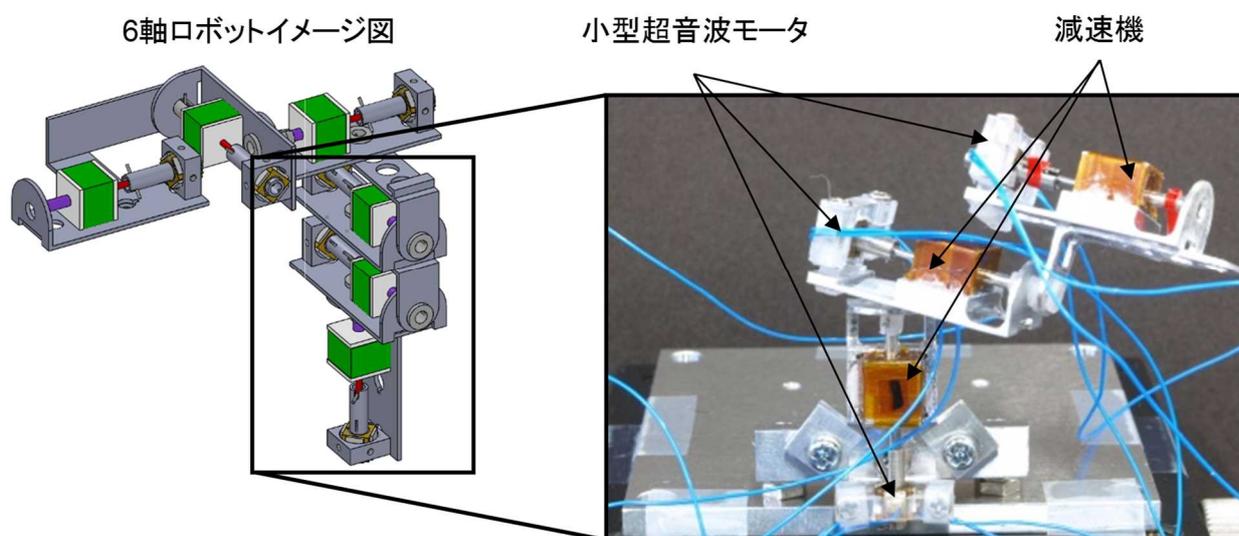


図 21 6 軸マイクロロボットのイメージ (左側) と実際の 3 軸マイクロロボット (右側)

マイクロアームについては、開発 2 年目後半に一次試作を行った。この時点では出力トルクが十分でない一次試作モータを利用したため、減速機（減速比 1/100、5 mm 角大）を利用した。まず、製作したマイクロ超音波モータ 6 個をヒンジで接続することで 6 自由度ロボットを想定した。このマイクロロボットの逆運動学を高速で解くことができるアルゴリズムを作成した（6 自由度ロボットは汎用の産業ロボットと同じ構成とした）。アームの設計では、モータステータの支持部が超音波振動を阻害しないように支持するような機構が必要である。このため、振動変位が小さい箇所（節付近）で支持するか、ステータに薄いフィンを付け（振動モードが変化しない程度）固定する等の対策を行うことが考えられる。実験を行った結果、振動を阻害しない箇所を求め、また、適切な押付力も定めた。さらに、微小な部品も容易に脱着でき、ロボット全体が可能な限り小さくなるように、設計を行なった。目標とする仕様は、ロボットの先端で上下 6 mm 程度の移動と傾斜 $\pm 90^\circ$ 変化できることである。

しかし、二次試作のモータを使うことで減速機の部分は不要になる。このためマイクロアームは全長 20 mm 前後となる。すべての関節にモータ、回転変位計を持ち、ユニット化されて脱着が容易となっている。

以上まとめると、マイクロロボットは、メッシュロボットの要素として十分な出力トルクを持つこと（1.1 1)e）マイクロモータの改良（二次試作）を参照）、位置制御およびコンプライアンス制御ができること（同じく 1.1 1)e）マイクロモータの改良（二次試作）を参照）、多数のロボットを製作しても安定して均一な特性をもつこと（2）マイクロロボットの設計製作（1）マイクロロボット用モータユニットの設計製作を参照）が確認された。

3) メッシュロボットの開発

逆運動学モデルを解き、時間ごとのアーム先端の位置に対応した時間ごとのモータの回転角度を算出するプログラムを作成した。図 22 にシミュレーションの実行結果の一例を示す。マイクロロボット本体がまだ完全に完成していないため、シミュレーション上でプログラムによって出力される制御角度が正しいことを確認した。このシミュレーションはメッシュロボット全体に対するシミュレーションである。このため、制御器にプログラムを移植する際は、プログラムからの出力値に減速機等による影響を考慮した係数を掛けるだけで制御に必要な値を得ることができる。今後はマイクロロボットへの位置制御器の取り付けと並行し、プログラムを実際の制御器へ移植する。

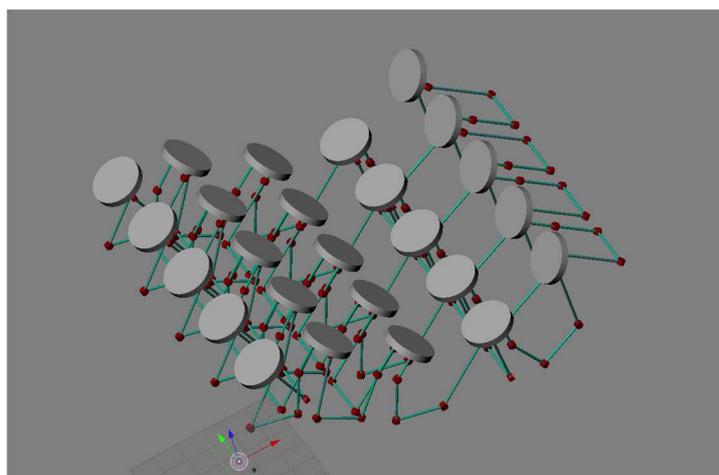


図 22 シミュレーション実行結果の出力画面

メッシュロボットについては、複数台のマイクロロボットを縦横に組み合わせることでメッシュ状の閉リンク機構の多自由度ロボット（メッシュロボット）を開発する計画であったが、開発時間と予算の制約によりマイクロ超音波モータの性能向上を達成した段階で本研究は終了した。しかし、本質的な要素であるマイクロ超音波モータの完成により、ユニット化したモータモジュールは安定した性能が期待でき、これを組み合わせたマイクロロボットも問題なく製作できることが考えられる。一方、メッシュロボットはマイクロロボットを複数組み合わせた構造であり、開発における困難さは大きくないと思われる。ただし、圧電素子や制御回路、コンピュータなどの配線、制御回路の高速化などの付随的な課題は残るが、これらは従来技術で対処できる。従って、メッシュロボットの本質的な開発要因であるマイクロ超音波モータの性能達成により、実質的な開発要因は解決したと考えている。

メッシュロボットには、コントローラを含めて携帯可能な大きさであること、任意の形状を再現できること、触覚／力覚提示に利用できることが求められる。メッシュロボットは $5 \times 5 \text{ mm}$ のプレートを持った 50 mm 四方の正方形の大きさを想定しており、これらを制御するコントローラは名刺大のサイズであり 1 基板あたりモータ 2 個を制御できる。マイクロロボットは 6 個のモータを有するため 3 枚のコントローラが必要であり、メッシュロボット全体ではマイクロロボットが 44 個必要となるため $3 \times 44 = 132$ 個のコントローラが必要となる。これではコントローラがかなり大きくなるため、コントローラのデジタル部のワンチップ化が必要となる。現在の微細技術による回路設計でも葉書大になると思われるため、バッテリーを含めた状態で手の甲あるいは腕への装着を目指す事は可能である。

また、メッシュロボットに対して目標とする仕様は、 $0 \text{ N} \sim 5 \text{ N}$ のレンジにおいて 0.01 N の精度で力覚提示ができること、表面粗さ $0 \text{ mm} \sim 17 \text{ mm}$ の凹凸を触覚提示ができることである。先程の $5 \times 5 \text{ mm}$ のプレートを持った 50 mm 四方のメッシュロボットを考えた場合、メッシュロボット中央部で $0 \text{ N} \sim 5 \text{ N}$ のレンジで力を発生させるには高出力のマイクロ超音波モータを利用すれば実現できることが考えられる。また、力の精度はこれまでの実験より 0.01 N (1.0 gf) 程度は可能である。一方、メッシュロボット中央部で $0 \text{ mm} \sim 17 \text{ mm}$ の凹凸の触覚提示については、マイクロロボットの大きさ（長さ）を調整することで容易に実現できることが考えられる。

4) メッシュロボットによる触覚力覚提示

モータ機構の最適化検討のため球状の接触面を持つ新型の小型超音波モータを製作し、各種特性の測定と評価を行った。また、小型超音波モータの応答性の測定を行った。ステップ応答性の測定では本モータが駆動可能な周波数範囲において 0.374 ms という機械的時定数で駆動することを確認することができ、超音波モータの特徴である応答性の高さを小型超音波モータも発揮することができていると考えられる。実際、 $\pm 5^\circ$ の角度で正逆転させる運動を印加したところ、 477 Hz で -3 dB の低下であった（無負荷の状態、電圧 $300 \text{ V}_{\text{p-p}}$ ）ことを考えると、メッシュロボットとして組み立てるとモータの負荷が増え、応答速度が遅れたとしても、 $40 \text{ Hz} \sim 50 \text{ Hz}$ 程度は確保され、高速な応答が期待できる。

当初は、メッシュロボットによるコンプライアンス制御、力制御を行い、触覚／力覚提示の実験を行う計画であった。しかしながら、以上で述べたように時間と予算の制約があったため、マイクロ超音波モータの開発までで本研究は終了しマイクロロボットとメッシュロボットの開発は実施できない

かった。一方、メッシュロボットの開発とその制御に関する本質的な課題は高出力のマイクロ超音波モータの開発であるが、メッシュロボットに関する本質的な課題は達成できたと考えている。

計画ではさらに、実証試験では視覚情報とパワーアシストスーツのシステムと組み合わせて、3次元のVRによる触覚/力覚提示を行う予定であったが、時間と予算の制約により実現できなかった。しかしながら、視覚情報の処理は既存技術で十分であり、パワーアシストスーツはすでに研究室で実用的なものが開発されている。メッシュロボットが完成すれば、いつでも実験を実施できる環境である。なお、マイクロ超音波モータの時定数は1 msec以下であるため、メッシュロボットのプレートを連続的に高速に運動させることで、大きな物体の表面を表現することができる。即ち、手で実際の物体をなぞるような感覚を得ることが可能である。

今後のロードマップ

この結果よりメッシュロボットを実現するための最適なアプローチを検討し、これに基づく技術ロードマップを取りまとめる。

初年度、次年度：1 mm 角モータの製作技術の確立と評価、試作

掌上に載せるメッシュロボットのためには、1 mm 角のマイクロ超音波モータが必要である。できるならもっと微小なモータが望ましいが、圧電素子の加工精度より現実的には1 mm 角のモータが最小である。すでに3 mm 角のモータが完成しているので、このまま1 mm サイズに縮小すればよい。ただし、さらにモータの高トルク化をはかるため球面を有するロータの接触部（球の一部）に数 μm 程度の摩擦材（摩擦係数が大きく、弾性率も適切な材料）を塗布するなどの改良が必要であろう。モータ単体の開発以外に、コントローラのコンパクト化が必要である。即ち、モータが数百以上あるので、コイルを含めて制御部の最小化（ワンチップ化）が必要となる。これは従来技術で対処できると思われる。さらに重要であるのは、コントローラからモータへの配線である。CAN 接続のように配線の本数を減らす等の工夫が必要である。この際重要となるのはサイクルタイムを1 msec以内として高速性を確保することである。その他の技術を含めて最短でも2年は必要である。

3年－8年：メッシュロボットのためのマイクロロボットの開発と制御

位置制御とコンプライアンス制御

何度も述べたようにメッシュロボットの本質的な技術はマイクロ超音波モータの開発である。これを初年度と次年度で行うとすると、その後でマイクロロボットの開発とメッシュロボットの開発が続く。マイクロロボットは、位置検出機とモータをセットにしたユニットを用いることで安定したアームを組むことができる。また、不具合がでたモータの取り替えなども迅速に行うことができる。マイクロロボットの開発に困難はない。メッシュロボットもマイクロロボットの組み合わせのため、開発に困難はない。しかし、メッシュロボットに対して部分的に変化するコンプライアンスを持たせることは大きな課題である。即ち、あるプレートは柔らかく、あるプレートは硬いコンプライアンスを設定したいとしても、任意に設定することは難しい。即ち中央部だけ硬く、周辺は柔らかくすると、中央部を押すと周辺部が変形し柔らかく感じることになり、設定とは異なる感覚となる。これは基本的にメッシュロボットのコンプライアンスは隣通しの関係で設定する必要があるためである。このように対象物の表面のコンプライアンスをどのようにメッシュロボットあるいはマイクロロボットのコンプライアンスに変換するかは大きな課題である。このための技術（ソフトウェア）が必要となる。一方、メッシュロボットの形状はプレートの位置姿勢情報を与えれば、逆運動学を解くことでモータ

の回転角を求めることができる。これはすでに高速なプログラムがある。これらのために必要な開発期間は5～6年である。

9年ー14年：メッシュロボットの試作と評価、VR装置との連動技術の開発

メッシュロボットを触覚／力覚提示とするためには周辺技術が必要である。例えば、グローブへの搭載、コントローラとバッテリーの搭載、他のシステム（ビジョンなど）との接続などである。これらは従来技術であり、技術的な困難はないが2～3年は必要である。最終的にはVR装置との連動が必要である。対象物の形状とコンプライアンス情報から、メッシュロボットのモータ制御に至る技術である。これらも従来技術であり、新たな開発は必要ない。5～6年の開発期間は必要と思われる。

1. 2 研究課題終了後の将来性

本研究開発の大きな成果は、高出力トルクのマイクロ超音波モータの開発とこれを組み合わせたメッシュロボットの展望を示したことである。メッシュロボットの応用先として、

- ①衣服型に成型したメッシュロボットを使ったしなやかな装着型パワーアシスト
- ②縦に長いメッシュロボットを利用した人工筋肉
- ③手術ロボット（ダビンチなど）の触覚／力覚提示

などの医療福祉などがある。特に重要な応用先は③である。現在の手術ロボットは力をフィードバックできないため、術者は視覚だけで手術を行っている。本メッシュロボットを利用することで、1 msecのサイクルタイム、1.0 gfの力の精度が期待できるため術者の手による手術と同等の期待ができる。

これらのメッシュロボットを作るに当たって課題となるのは、

- ①部品加工の技術、サブミリレベルで1/500 mm程度の精度が保証できる技術
- ②多数のモータドライバー、制御器の開発実装技術

である。

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

特になし。

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

国際学会「27th International Conference on Vibroengineering 2017」にて発表した「Micro ultrasonic motor for miniature robot arm」に対して最優秀論文賞を受賞。

1. 5 研究実施体制とマネジメント

特になし。

1. 6 経費の効率的執行

特になし。

2. 平成30年度（報告年度）の実施内容

2. 1 平成30年度の実施計画

① モータ機構の最適化

2017年度に作製した3mm角モータを改良し、減速機を使用せずに高トルクを実現する方法を模索する。

これまでの研究成果より、ステータとロータ間の押付力の向上がトルクの向上に寄与することが明らかになっている。しかしながら、従来の3mm角モータでは、コーン状のSUSロータとSUSステータの組み合わせにおいては、メタルどうしの接触のため接触点も不安定であり押付力だけでは目標値までトルクが上がらないという問題があった。このため、2018年度は、2つの樹脂球がバネで接続された構造のロータを新規に作製する。樹脂ロータとSUSステータの組み合わせにより、接触面積の増大及び押し付けの安定化が可能となり、トルク向上が期待できる。樹脂球の材料としては、ポリカーボネートを想定している。

さらに、圧電素子への印加電圧増によるトルク向上を検証する。現状の印加電圧は120Vであるが、印加電圧を増やし、耐圧限界までの印加電圧とトルクの関係性を明らかにするとともに、素子厚を増やすことで耐圧を高めた圧電素子を導入し高印加電圧動作の検証を行う。

② 外挿によるモータ性能の検討

メッシュロボットの実現には、1mm角のモータが要求される。この性能を推算するために、外挿により1mm角モータの性能を類推し評価することを目指す。

ロータとステータ間の押し付け力を変化させて、回転速度とトルクの特性格を求め、最大限に出力トルクを得るための条件を明らかにする。さらに、3mmの特性格から3乗則を用いて1mm角モータの性能を予測し、1mm角モータにおいて30rpm、10mNmを実現する条件を明らかにする。

③ モータの制御及び評価

モータの回転軸先端に超小型のロータリエンコーダーあるいは着磁した着脱可能なゴムキャップを装着し、ホールセンサにより角度を検出することで、制御を行う。

モータ制御の評価として、ステップ入力に対する応答の立ち上がりの評価と、正弦波入力に対する応答性の評価を行う。ステップ入力に対する応答の立ち上がりは1msec以内を目標とする。正弦波入力に対する応答性は40Hzの正弦波を-3dbで追従することを目標とする。

評価対象とするモータは3mm角モータを想定しているが、目標とする応答性が超音波モータの寸法に依らず得られることを確認・評価することとする。

④ ロードマップの提示

②で評価した回転速度とトルクの特性格と③で評価したモータ制御の評価結果より、モータに関する具体的な改良項目と目標数値を明らかにするとともに、これまでの研究により得られた成果も踏まえてメッシュロボット実現に向けた技術ロードマップを提示する。

⑤ プロジェクトの総合的推進

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

2. 2 平成 30 年度の研究実施日程

業務項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①モータ機構の最適化										→		
②外挿によるモータ性能の検討												→
③モータの制御及び評価										→		
④ロードマップの提示												→

2. 3 平成 30 年度の研究成果の説明

① モータ機構の最適化

(1) 新型小型超音波モータの構造について

昨年度製作したテーパ形状のロータを用いたマイクロ超音波モータを図 23 に、モータの 3D モデルによる外観と詳細図を図 24 に、モータの断面図を図 25 に示す。ロータはテーパ形状を持つ 2 つの中空軸で構成されている。分割された軸をフックとバネによって引き寄せることで軸を軸穴に接触させるための押付力が発揮される。しかし、上述のロータをもつ小型超音波モータでは、回転しないことや回転が不安定になることがあった。超音波モータの駆動源は接触による摩擦力であるため、ロータとステータ軸穴のテーパ形状が適切に接触しないことが原因と考えられた。この問題を解決するため、ロータとステータが適切に接触することが期待できる球状の接触面を持つロータを新たに製作した。

今回新しく製作したロータを用いた小型超音波モータを図 26 に、モータの 3D モデルによる概観と組立図を図 27 に、モータの断面図を図 28 に示す。新しいロータは、半球状の SUS303 製接触部品と中央部にキー溝および両端部にねじ加工を施した金属製軸により構成される。キーにより SUS303 製接触部品と A5052 製軸が一体となり回転する。接触部品を図 29 に示す。また、押付力をコントロールするため両側にバネとナットを設けた。表 2 に本研究で使用したコイルばねの仕様を示す。

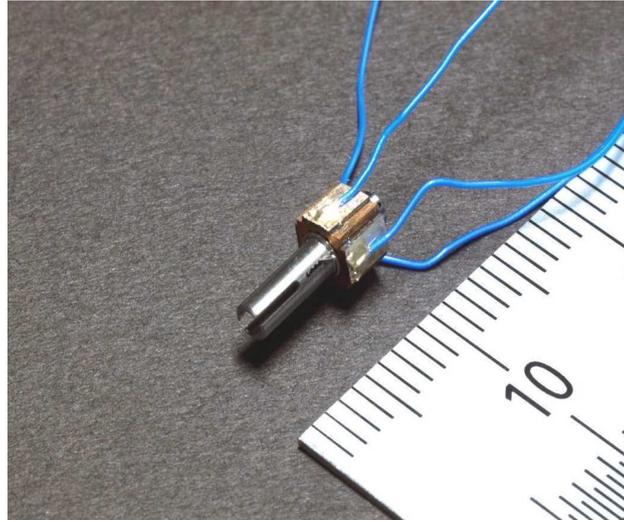
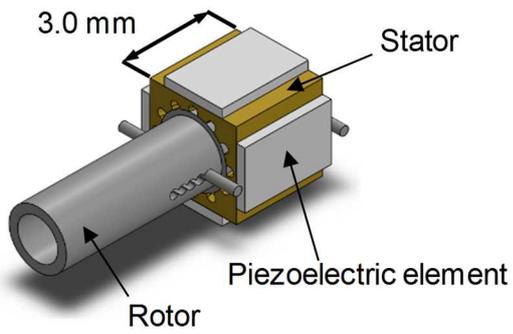
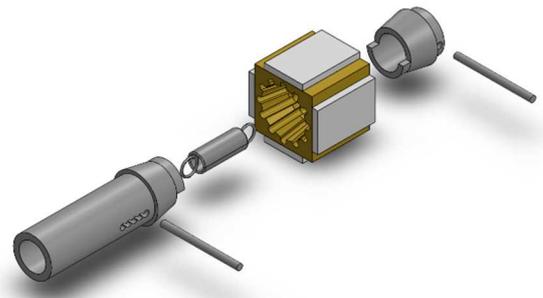


図 23 一次試作モータ



(a) モータ外観



(b) 詳細図

図 24 一次試作マイクロ超音波モータの外観および詳細図

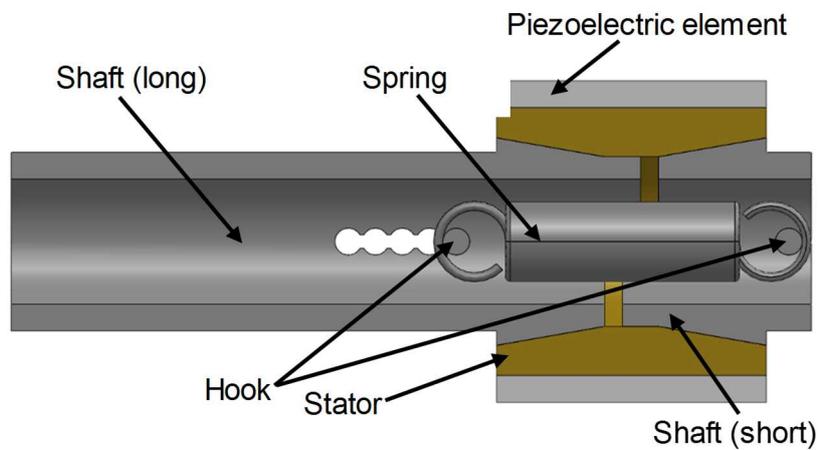
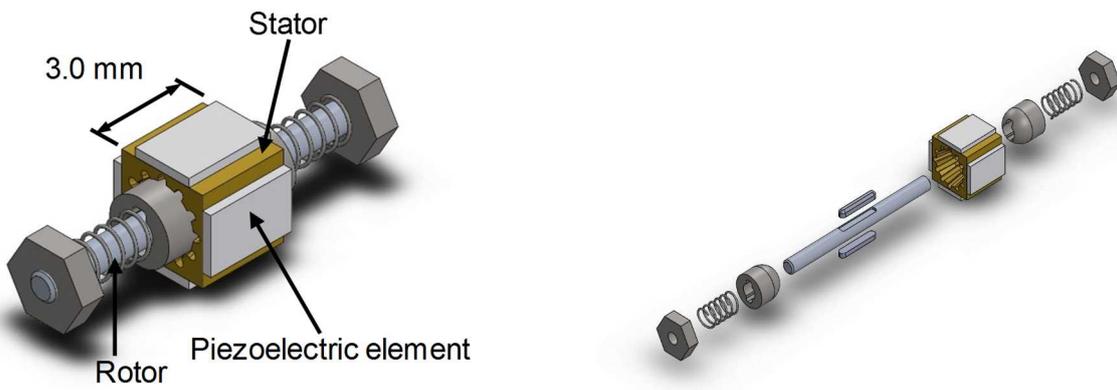


図 25 一次試作マイクロ超音波モータの断面図



図 26 二次試作マイクロ超音波モータ



(a) モータ外観

(b) 詳細図

図 27 二次試作マイクロ超音波モータの外観および詳細図

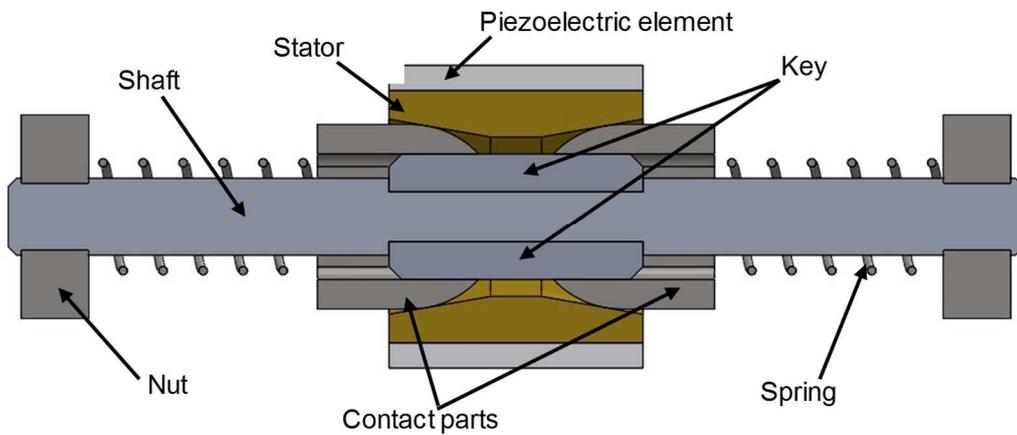


図 28 二次試作マイクロ超音波モータの断面図



図 29 接触部品

表 2 コイルばねの仕様

Actual producer	Accurate Inc.	
Material	SUS304 WPB	
Model number	DC-001	DC-051
Free height	2.6 mm	3.1 mm
Diameter	1.30 mm	1.76 mm
Spring constant	0.147 N/mm	0.412 N/mm

(2) 新型小型超音波モータの各種特性

・基本的特性の測定方法について

位相差を持った交流電圧を使用して駆動する圧電アクチュエータはその印加する電圧、周波数、位相差を変化させることで速度を制御することが可能となる。これは超音波モータにおいても同様である。測定は回転軸先端に取り付けた磁石と磁気角度センサを用いて行い、時間当たりの角度変化から回転速度を算出した。小型超音波モータにおいて回転を得るためには振幅を A 、周波数を f_r 、時間を t として次に示す各式の通り回転軸回りに位相が $\pi/2$ ずつ異なる 4 種の交流電圧 $E_{CH1} \sim E_{CH2}$ を印加する。

$$E_{CH1} = A \sin(2\pi f_r t) \quad (1)$$

$$E_{CH2} = A \sin(2\pi f_r t + \phi) \quad (2)$$

$$E_{CH3} = A \sin(2\pi f_r t + \pi) \quad (3)$$

$$E_{CH4} = A \sin(2\pi f_r t + (\pi + \phi)) \quad (4)$$

今回の実験において正弦波を発生させるために波形発生器を使用し、その増幅のためにアンプを 4 台使用している。また、ステータへの押付力を 44 mN として基本特性を測定した。

・印加電圧周波数－回転速度特性

印加電圧の周波数を変化させたときの回転速度の変化を測定する。すなわち印加電圧の式における f_r を変化させる。今回は 0.25 kHz ごとに周波数を変化させた。波形発生器の出力を 20 Vp-p、位相差 ϕ は 270°、アンプの倍率を 20 倍に設定した。

測定結果を図 30 に示す。最大回転速度は周波数が 246.50 kHz のときで 2312.0 rpm であった。また、回転が可能な周波数は 228.75 kHz から 262.00 kHz の約 33 kHz の範囲であった。回転速度が極大値となる周波数が 244.00 kHz と 246.50 kHz の 2 か所があり、244.25 kHz から 245.50 kHz 付近の周波数で回転速度の低下が確認できる。これは 4 枚の圧電素子の共振周波数が完全に一致していないことが原因と考えられる。以後の実験においては本実験で最も高い回転速度が得られた周波数である 246.50 kHz の電圧を印加した。

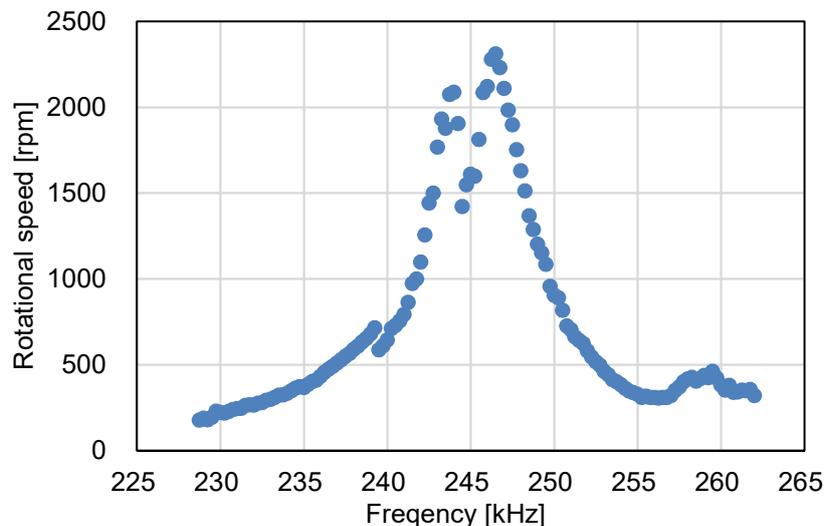


図 30 印加電圧周波数－回転速度特性

・印加電圧位相差—回転速度特性

印加電圧の位相差を変化させたときの回転速度の変化を測定する。すなわち印加電圧の式における位相差 ϕ を変化させる。今回は 10° ごとに位相差を変化させた。駆動周波数 f は測定において各ステータが最も大きい回転速度を記録した 246.50 kHz を使用し、波形発生器の出力を 20 Vp-p 、アンプの倍率を 20 倍に設定した。

図 31 に測定結果を示す。進行波型超音波モータや TR モータでの実験結果と同様の変化傾向が見られた。理想的な条件においては 0° 及び 180° で静止し、最大の回転速度は正転側では 90° 、逆転側では 270° のときに得られるはずである。しかし、実験結果では 30° 及び 210° で静止し、正転側で 140° のときの 2143.5 rpm 、逆転側で 290° のときの 2284.2 rpm が最大となった。つまり全体として+方向に $20^\circ\sim 30^\circ$ ほど平行に移動しているという結果となった。この原因として圧電素子の貼り付けによる位置の誤差が考えられる。ステータ上の進行波は位置的な位相差と時間差がともに $\pi/2$ である定在波が合成されることにより発生している。実際のステータでは圧電素子の貼り付ける際に位置や、軸方向に対しての角度のずれなどによって、定在波の位置的な位相差が $\pi/2$ でなくなり、実験結果にずれが生じたと考えられる。

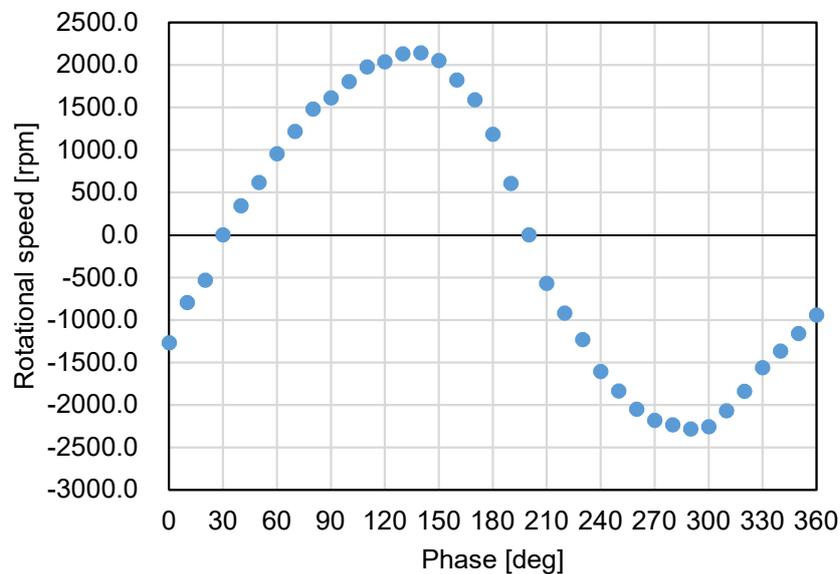


図 31 印加電圧位相差—回転速度特性

・印加電圧振幅－回転速度特性

印加電圧の振幅を変化させたときの回転速度の変化を測定する。すなわち印加電圧の式における振幅 A を変化させる。今回は波形発生器の出力を 0.5 Vp-p ごとに出力電圧を変化させた。駆動周波数 f_r は測定において各ステータが最も大きい回転速度を記録した 246.50 kHz を使用し、位相差 ϕ は 270° 、アンプの倍率を 20 倍に設定した。

実験結果を図 32 に示す。回転軸は 2 Vp-p から駆動し始め、電圧の増加と共に回転速度も増加することが分かる。これは進行波型超音波モータや TR モータでの実験結果と同様の变化傾向である。

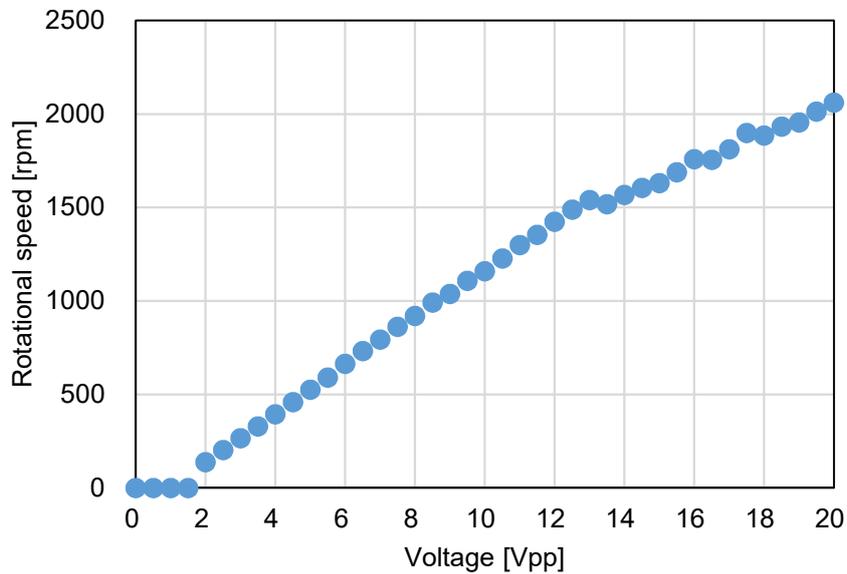


図 32 印加電圧振幅－回転速度特性

・ 押付力ー回転速度特性

ステータとロータ間の押付力を変化させた場合の回転速度の変化を測定する。ロータにあるナットの位置を調節してバネを縮め、ステータと回転軸間の押付力を変化させる。今回は 44 mN、88 mN、132 mN、176 mN の 4 段階の押付力で測定を行った。それぞれの押付力において印加電圧の周波数を 0.25 kHz ごとに変化させ、回転速度の変化を測定した。波形発生器の出力を 20 V_{p-p}、位相差 ϕ は 270°、アンプの倍率を 20 倍に設定した。

測定結果を図 33 に示す。最大回転速度とそのときの周波数は、44 mN では 246.50 kHz のとき 2312.0 rpm、88 mN では 246.25 kHz のとき 2274.4 rpm、132 mN では 246.25 kHz のとき 1938.0 rpm、176 mN では 244.00 kHz のとき 1721.2 rpm となった。また、押付力が増加すると回転速度が減少する傾向が見られた。これは先行研究で進行波型超音波モータにおいて押付力ー回転速度特性を測定した際に、押付力の増加に従い回転速度は減少するという同様な結果が得られている。押付力が 44 mN と 88 mN の場合の最大回転速度がほぼ同じ値であることが確認できる。本来ならば 44 mN の場合の方がより大きな値でなければならない。この原因としては押付力が 44 mN では小さすぎたため、ステータとロータ間で駆動力が適切に伝達されなかったことが考えられる。また、押付力が 176 mN の場合では共振周波数付近で値が大きくばらついていることが確認できる。これは押付力を大きくしたことにより、本来想定していた振動モード以外のモードも合わさって振動していたことが考えられる。

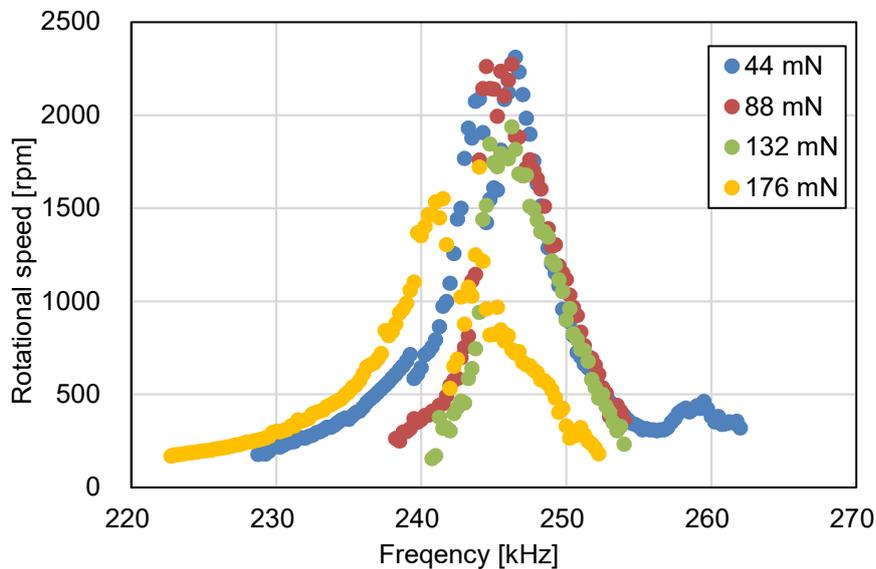


図 33 押付力ー回転速度特性

・ 押付カ-トルク特性

押付力を変化させた場合のトルクの変化を測定する。回転速度の測定時と同様に押付力を変化させ、44 mN、88 mN、132 mN、176 mN の4段階の押付力で測定を行った。重力加速度を 9.80665 m/s^2 としてトルクを算出した。

実験結果を図 34 に示す。最大トルクとそのときの周波数は、44 mN では 247.00 kHz のとき $212.7 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 、88 mN では 246.50 kHz のとき $402.5 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 、132 mN では 246.50 kHz のとき $399.1 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 、176 mN では 242.75 kHz のとき $166.6 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ となった。進行波型超音波モータにおいて押付カ-トルク特性を測定した実験では、押付力の増加に従いトルクが増加する結果が得られている。押付力が増加すると 44 mN と 88 mN ではトルクが増加する傾向が見られたが、88 mN と 132 mN ではほぼ同じ値であり、132 mN と 176 mN では減少する傾向にある。トルクが減少した原因として、押付力を大きくしたことにより、ステータとロータ間の回転と逆方向にかかる摩擦力による抵抗の影響が大きくなったことや、回転速度と同様に本来想定していた振動モード以外が現れていたことが考えられる。また、このモータがトルクを最大限出せる押付力は 88 mN と 132 mN の間にあったため、132 mN 以降はトルクが減少したと考えられる。

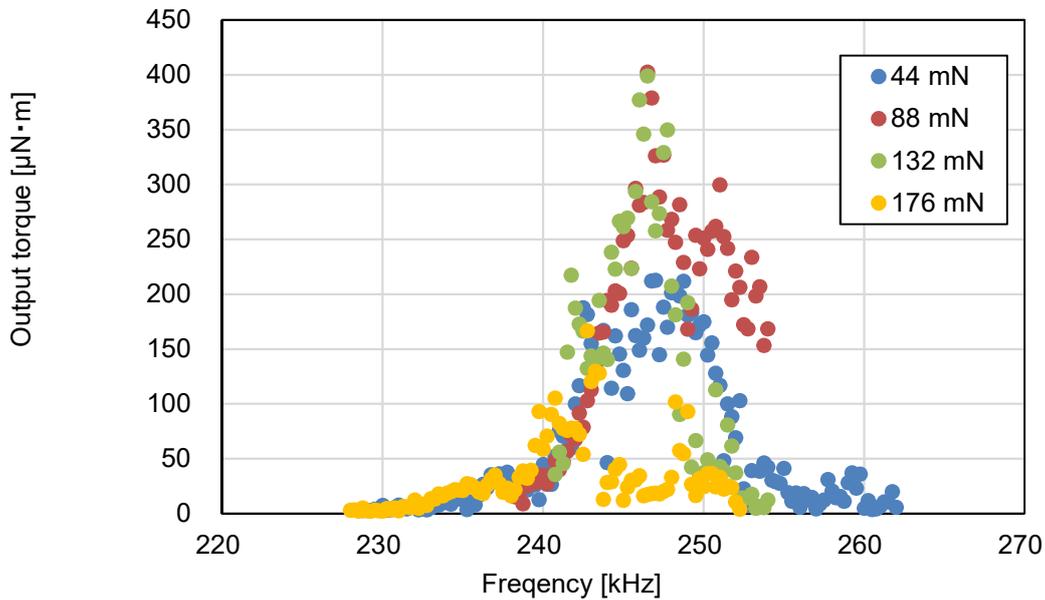


図 34 押付カ-トルク特性

② 外挿によるモータ性能の検討

形状提示装置の構成要素としてのモータの目標寸法は 1 mm 角、回転速度は 200 rpm、最大出力トルクは 5 mNm である。これまでに製作し、性能の取得を行ってきた 3 mm 角のモータの性能から外挿し、現在のモータを小型化した際のモータ性能の推定検討を行った。

最も弱い押付条件となる 44 mN のとき、3 mm 角形状のモータの回転速度は約 2000 rpm、最大出力トルクは約 200 μ Nm である。

出力トルク及び回転速度は形状寸法に線形に影響するとみなすと、トルクは 1/3 倍で約 67 μ Nm、回転速度は 3 倍で 6000 rpm となる。これより理想的な条件で目標回転速度まで押付力の調整により減速を行ったとすると、減速比は 1/30 となる。出力トルクは減速により増加するため、1 mm 角モータの出力トルクは 2 mNm となる。

現在は電圧増幅器の限界のため 300 Vp-p を基準としてきたが、モータの出力は電圧の増加に伴い線形に増加するため、750 Vp-p での運用が可能となれば目標とした出力トルクが実現可能であると推測される。

③ モータの制御及び評価

(1) モータのステップ応答性

回転の立ち上がり時における小型超音波モータの角度変化を測定し波形発生器の RUN 時出力を合わせて測定した。測定値は離散的な角度値のため直接速度への変換が困難であることから、近似処理を行い、角速度が安定した範囲から直線近似で求めた角速度を定常値とした。近似処理には最小二乗法を用い、6 次多項式にフィットさせた。立ち上がりの近似にはステップ入力前の 100 点、ステップ入力後の 200 点、定常角速度の近似にはステップ入力後の 50 点から 150 点を使用している。時刻は波形発生器の RUN 時電圧が high になった時刻を 0 として基準と設定した。回転速度の測定装置は前章までに示したものと同様である。測定は 244 kHz から 257 kHz の範囲で 1 kHz ごとに測定を行った。位相差 ϕ は 90°、増幅前波形振幅 20 Vp-p、増幅器倍率 20 倍とした。

図 35 に周波数ごとにおける時定数と定常角速度のグラフを示す。全体での時定数の平均値は 0.374 ms であった。本小型モータのロータを直径 2 mm、内径 1.4 mm の円筒と近似して簡易的に計算すると、慣性モーメントは 0.000745 gcm^2 である。市販されている小型の電磁モータのうち寸法の近い maxon 社製ブラシレスモータ EC4 とアダマンド並木精密宝石社製ブラシレスモータ BMN04-08 の仕様を表 3 に示す。無負荷回転速度や出力トルク、駆動電圧などの差異があるため各モータで有用な場面は異なるが、本小型超音波モータも一般的な超音波モータ同様に応答性の観点で他のモータに対して有意性があると考えられる。

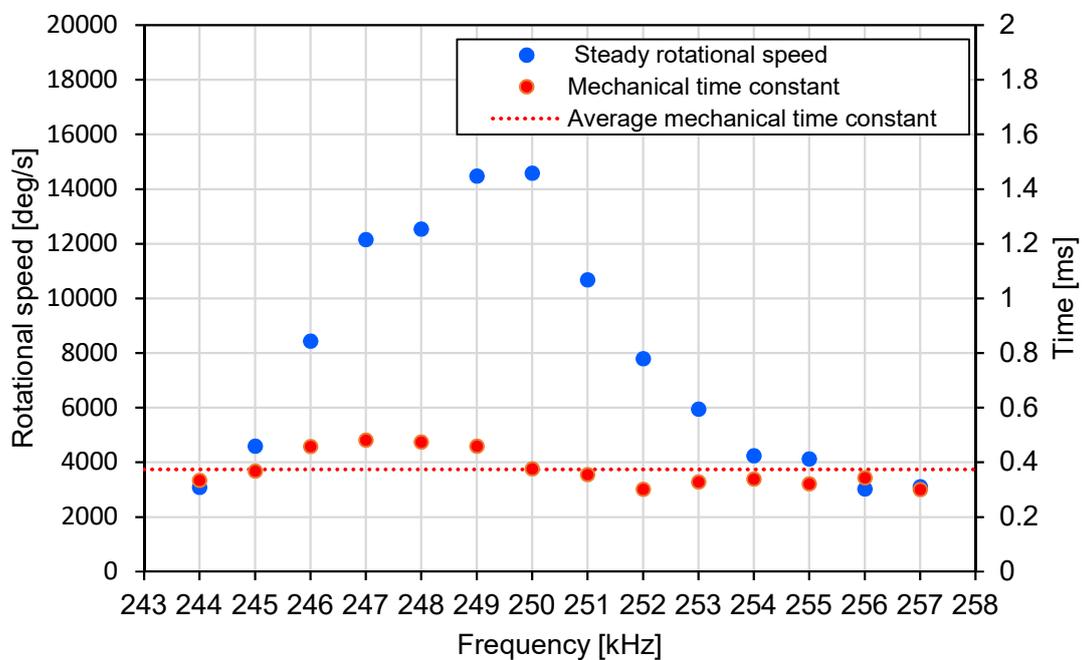


図 35 周波数応答性

表 3 DC モータとの比較

Model name	EC4	BMN04-08
Diameter	4 mm	4 mm
No load speed	31000 rpm	37000rpm
Rotor inertia	0.00164 gcm ²	0.00087 gcm ²
Mechanical time constant	0.897 ms	9.15 ms

(2) モータの周波数応答性

小型超音波モータは通常の電磁モータと異なり、印加電圧の正負方向の切り替えではなく回転軸であるロータの周方向に 90°位相をずらして配置される圧電素子に対して印加される交流電圧の位相差の変化によって回転方向の切り替えを可能とする。したがって電磁モータにおける周波数応答性では交流電圧を印加し、その周波数を変化させた際の回転量の測定を行うが、小型超音波モータでは正転の印加電圧位相と逆転の印加電圧位相をスイッチングする周波数を変化させ、その際の回転量の測定を行った。周波数応答性の測定ではこれまでの装置に加えてもう一台波形発生器を追加し、増幅前の波形を出力する波形発生器を PC から切り替えることで位相の切り替えを行った。正転と逆転の特性差の影響をなるべく低減するため、事前の測定において回転速度の値を測定し、増幅前波形振幅 20 Vp-p、増幅器倍率 20 倍時の条件において、正転 246.14 kHz、5670.9 deg/s、逆転 246.5 kHz、6134.7 deg/s で測定を行った。

各測定結果から得たそれぞれの周波数における振幅の平均値を図 36 に示す。現在の測定環境では波形発生器への操作命令の転送速度などの制限から 48 Hz (正転逆転切り替え 10 ms 毎)が限界であったが、その後も同じ傾向で振幅が低下していくとして対数変換して直線近似した。近似式である

$$y = 6205.8x^{-1.155} \quad (5)$$

から、周波数応答として指標となる出力振幅が 3 deg となる周波数は 742.5 Hz、5 deg となる周波数は 477.1 Hz であると予想される。

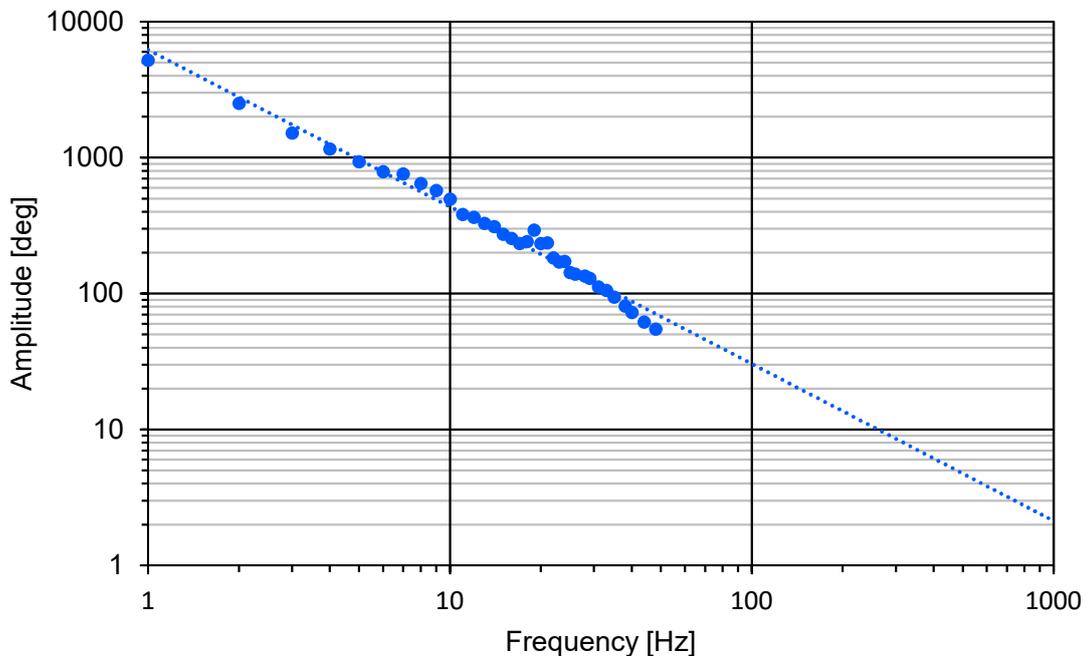


図 36 周波数応答性

(3) モータの温度特性の評価

圧電材料は一般組成式が ABO_3 で表されるペロブスカイト型と呼ばれる結晶構造を持つ。図 37 にペロブスカイト型結晶構造の模式図を示す。この結晶構造は高温相では結晶対称性の高い立方晶であり、温度降下により中心対称性を持たない直方体の正方晶、もしくは菱面体晶に相転移する。この相転移をする温度がキュリー温度もしくはキュリー点と呼ばれる。キュリー温度以下では図 37 に示す B イオンが酸素イオンに接近することになり、双極子モーメントが生じ自発分極の主な原因となる。圧電体として用いられるセラミックスはこのような性質を持った強誘電体微結晶の集合であり、自然状態では各結晶における自発分極の方向はあらゆる方向を向いている。この状態では外部から微小電界を印加しても各結晶の圧電効果が相互に打ち消しあうため、正圧電効果は得られない。圧電効果を持たせるためには自発分極の向きを揃える必要があり、強い直流電界を与える（分極する）ことで可能となる。

このような原理をもつ圧電素子であるため、キュリー温度に到達すると再度相転移が起こり、自発分極が消失する。つまり変位を生じなくなってしまうため、超音波モータが駆動するための振動の励起も不可能となってしまう。そのため駆動により摩擦や圧電素子自体からの発熱を生じる超音波モータではこれらの温度に対して余裕のある温度域での駆動が必要となる。今回使用している圧電素子はハード材であり、誘電損失の低さから内部発熱が低く共振周波数での継続的な使用に適しているが、実際の駆動時にどのような温度変化が生じているかはこれまで検証してこなかった。そこで長時間の連続回転において圧電素子表面の温度変化の測定を行った。本モータに使用している N85 材のキュリー温度は 250°C であり、この値が一つの目安となる。

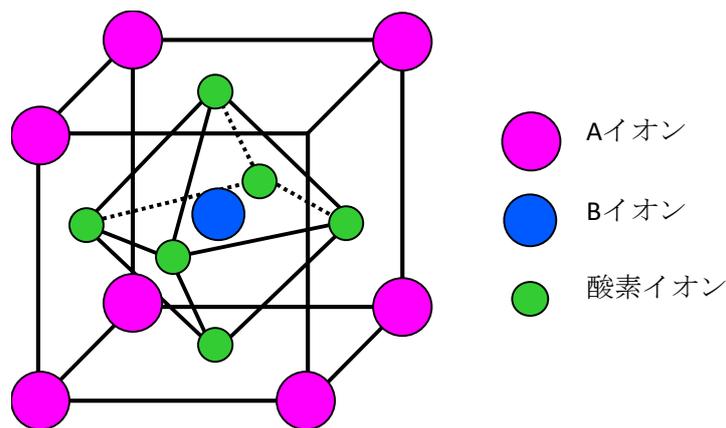


図 37 圧電素子の結晶構造

温度測定は K 型熱電対及び熱電対用データロガーを用いて測定を行った。測定部は圧電素子の表面とした。圧電素子表面は電圧を印加する都合直接熱電対を接触させることができないため、絶縁を確保しなるべく温度測定への影響がない様、厚み 0.1 mm のテフロンシートを絶縁体として用いた。

温度測定実験のため、実験に使用する小型超音波モータの共振周波数の確認を行った。図 38 に印加電圧周波数-回転速度特性を示す。位相差 ϕ は 90° 、増幅前波形振幅 20 Vp-p 、増幅器倍率 20 倍とした。回転速度の測定は第 4 章の測定方法と同様である。測定結果より最大回転速度 3214.5 rpm は 246.5 kHz において得られた。本測定ではこの周波数を共振周波数として測定を行う。

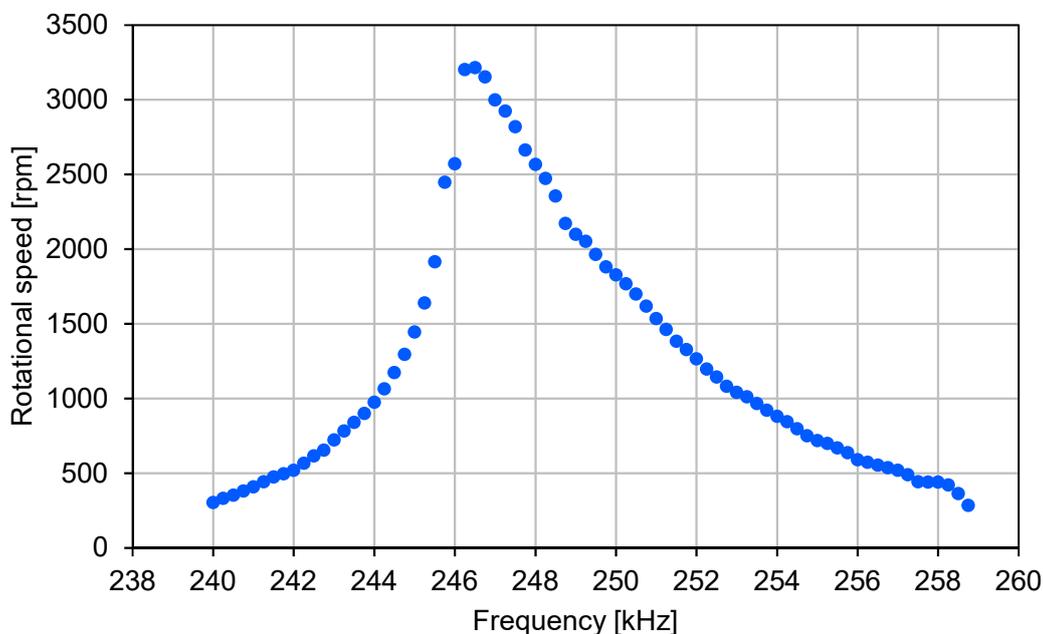


図 38 印加電圧周波数-回転速度特性

本小型超音波モータの使用上の限界を得るため 300 秒の連続駆動実験を行い圧電素子の温度変化を測定した。なお、全ての測定において室温は 23.5°C から 24.8°C の範囲を維持している。測定は最も温度上昇が大きいと予想される共振周波数である 246.5 kHz において電圧の影響を検証するため、波形発生器電圧振幅を 20 Vp-p と 10 Vp-p 、回転速度及び印加電圧周波数の影響を比較するため、 246.5 kHz 波形発生器電圧振幅 10 Vp-p の条件における回転速度と近い回転速度が得られた 242.75 kHz 、及び 255.75 kHz で測定を行った。また回転による摩擦の影響を比較するため 246.5 kHz 、 20 Vp-p においてロータを外した状態での測定を行った。温度の取得は1秒ごとに行っている。図 39 から図 43 に各条件における 5 分間の駆動による圧電素子の温度変化を示す。温度結果より共振周波数における最大温度は 56.6°C とキュリー温度である 250°C を下回っていることを確認することができた。またほぼ同じ回転速度の 242.75 kHz で最高温度が 33.8°C 、 255.75 kHz で 34.1°C と大きな差は見られなかったことから印加電圧の周波数が高周波側に推移することによる影響は本超音波モータの駆動可能範囲の中では無いと言える。また共振周波数でのロータを外した状態での測定を行った結果での最高温度 53.3°C と比較すると、摩擦がないことで温度は低下しているが、影響はごくわずかであることが分かった。

以上のことから印加電圧周波数が共振条件であることが最も発熱に寄与していると考えられる。しかしながら本小型モータの実用範囲ではキュリー温度に影響を及ぼす発熱が生じないことを確認することができた。

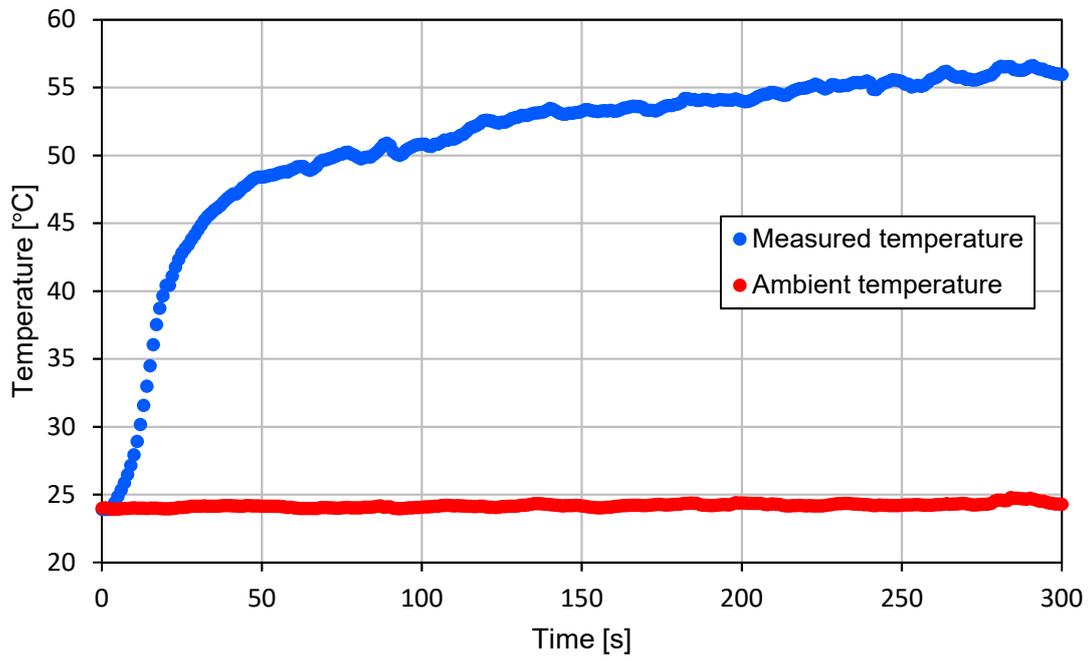


図 39 圧電素子温度上昇 (246.5 kHz, 10 Vp-p)

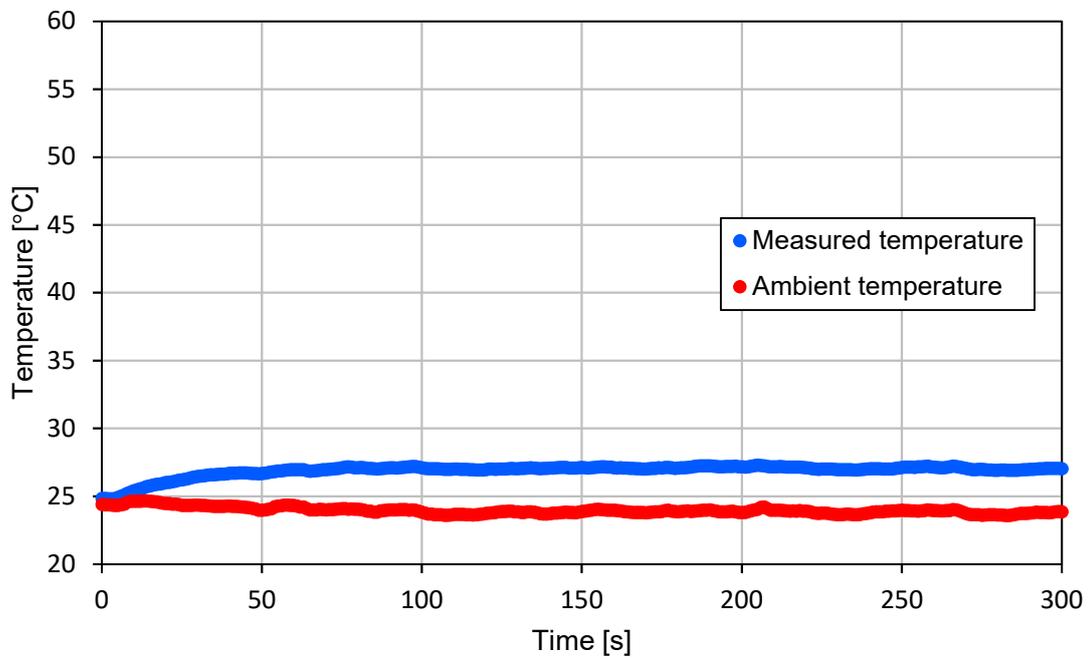


図 40 圧電素子温度上昇 (246.5 kHz, 5 Vp-p)

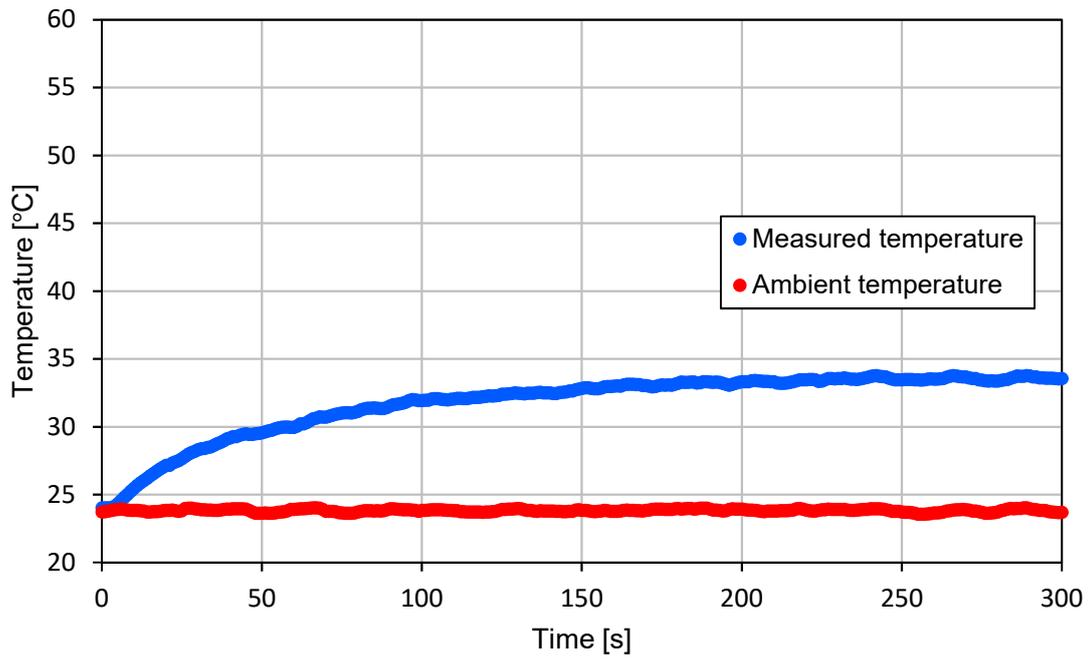


図 41 圧電素子温度上昇 (242.75 kHz, 10 Vp-p)

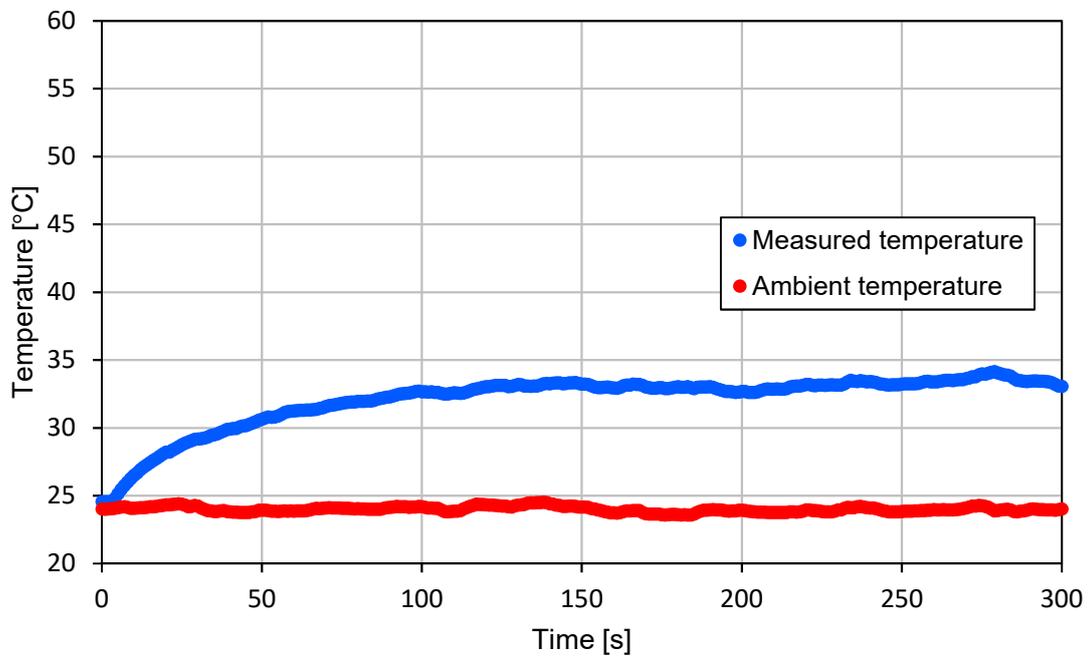


図 42 圧電素子温度上昇 (255.75 kHz, 10 Vp-p)

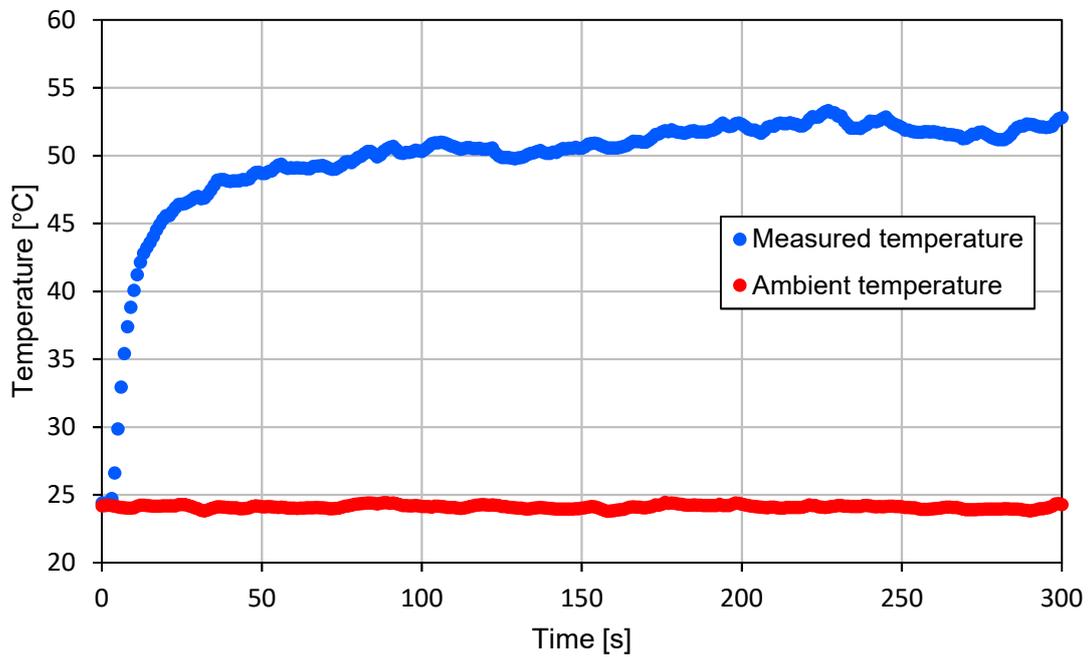


図 43 圧電素子温度上昇 (255.75 kHz, 10 V_{p-p}, ロータ無し)

④ ロードマップの提示

- 2019-2020 1 mm 角モータの製作技術の確立と評価、試作
- 2020-2025 メッシュロボットのためのマイクロアームの開発と制御
位置制御とコンプライアンス制御
- 2025-2030 メッシュロボットの試作と評価、VR 装置との連動技術の開発

3. 成果の外部への発表及び活動

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
押付力発生機構を有する小型超音波モータの開発（口頭）	工藤隆成, 松嶋幸平, 西澤宇一, 遠山茂樹	2017年度精密工学会秋季大会学術講演会	2017年9月	国内
Micro ultrasonic motor for miniature robot arm（口頭）	Shigeki Toyama, Uichi Nishizawa	27th International Conference on Vibroengineering	2017年9月	国外
Mesh robot developed by micro ultrasonic motor（口頭）	Shigeki Toyama, Uichi Nishizawa	16th International Conference on New Actuators	2018年6月	国外
押付力発生機構を有する小型超音波モータの開発（第二報）（ポスター）	工藤隆成, 西澤宇一, 遠山茂樹	2018年度精密工学会秋季大会学術講演会	2018年9月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Micro ultrasonic motor for miniature robot arm	Shigeki Toyama, Uichi Nishizawa	Vibroengineering PROCEDIA	2017年9月	国外
Mesh robot developed by micro ultrasonic motor	Shigeki Toyama, Uichi Nishizawa	ACTUATOR 18	2018年6月	国外

3) 知的財産権の申請状況

実施年度	発明の名称	発明者（所属）	出願登録区分	出願番号（出願日）	出願区分	出願国	登録番号（登録日）	メモ
29	超音波モータ、ロボットアーム	遠山茂樹（東京農工大学）	出願	2017-122494（2017/6/22）	国内	日本		

4. まとめ、今後の予定

マイクロ超音波モータの開発を行った。これを応用しマイクロアームの試作を行った。マイクロ超音波モータ（3 mm 角大）は、回転数が 100 rpm に、出力トルクは 8 mNm 程度と期待できる成果を得た。また、応答性と空間安定性の測定を行った。ステップ応答性の測定では駆動可能な周波数範囲において 0.374 ms の機械的時定数、周波数応答では、 $\pm 5^\circ$ の角度で正逆転させる運動をについて、477 Hz で-3 dB の低下であった（無負荷の状態、電圧 300 Vp-p、外挿で得た値）。モータの駆動時の温度特性についても実験を行った。通常の利用では、キュリー点からは余裕のある範囲で使用できることを明らかにした。これより 1 mm 角のマイクロ超音波モータの特性を予想した。

今後はこの特性を考慮したモータの力学モデルを作成し、マイクロアーム、メッシュロボットの動的モデルを作成することで、形状の変化、応答性、コンプライアンス制御の精度を評価する。あわせて、実際のメッシュロボットの試作を行う予定である。