

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13896

研究課題名(和文) 潤滑剤導入による超音波モータの高効率化・寿命改善とそのメカニズム解明

研究課題名(英文) Improvement in efficiency and life of ultrasonic motor by introducing lubrication mechanism

研究代表者

中村 健太郎 (Nakamura, Kentaro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：20242315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：超音波振動でロータを摩擦駆動する超音波モータは、大きなトルク-重量比が得られるため、ロボット用途などに期待される。しかし、振動による摩擦制御の動作が不十分なため、効率は50%以下、寿命は高々数千時間であった。本研究では、超音波モータの摩擦駆動部に潤滑油を導入し、振動による潤滑特性の動的変化を積極的に活用することで、複合振動子型超音波モータの効率を70%程度まで引き上げた。これは、駆動力に寄与しない振動の負の半周期に残留する摩擦力を流体潤滑により低減し、正の半周期では境界潤滑により必要な駆動力を発生できるためと考えられる。潤滑油の性質やロータ接触面の材質・形状などの影響も実験的に検討した。

研究成果の概要(英文)：Ultrasonic motor is an actuator driven by high frequency vibration through friction force, and provides quick response and high torque-to-weight ratio. But its application has been restricted to special areas such as auto-focusing in camera and other precise positioning systems because its efficiency and life were limited. To overcome this problem, this study introduced lubricant in the friction interface between the rotor and vibrator, and then succeeded in developing efficient and durable ultrasonic motor. We carefully researched on the conditions of preload and vibration amplitude. The efficiency has been improved from 40% to 70% in hybrid transducer-type ultrasonic motors. Our experiments also proved that the life was successfully extended, and the operation stability was improved. In addition, the effects of the lubricant characteristics and the materials of contacting surfaces were experimentally investigated.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波 超音波モータ 摩擦駆動 潤滑 潤滑油 効率 トルク 圧電素子

1. 研究開始当初の背景

ロボット分野をはじめ多くの制御分野、モーションコントロール分野でモータの軽量化が強く望まれている。すなわち、軽量で出力トルクの大きいモータが必要とされている。しかし、電磁型モータでは小型化した場合の性能低下が避け難い。これに対し、超音波モータは、図1のように、小型化しても軽量・高推力であるため、カメラやコピー機に利用されている。超音波モータは、超音波振動でロータを摩擦駆動する方式のモータであり、楕円振動軌跡を描くような振動を形成することで、駆動力を発生する。しかし、振動源に用いられる圧電振動子の高いエネルギー密度から期待される出力は未だ得られていない。また、摩擦駆動部の寿命が実用上、不十分である応用もある。超音波モータの研究は、振動モードの選択や利用方法に関する研究例は多いが摩擦駆動部の詳細なメカニズムやその改善に関する研究はあまり多くはない。

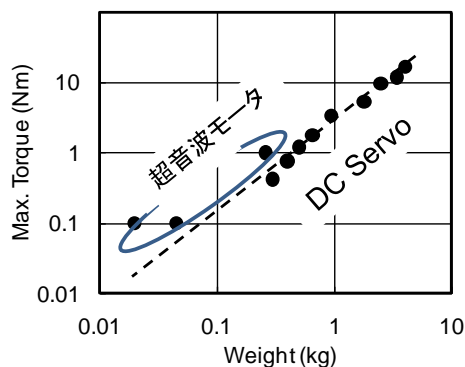


図1 超音波モータと電磁モータ (DC サーボモータ) のトルク-重量特性

2. 研究の目的

本研究では、超音波モータの効率や寿命が低い原因に関して、研究代表者が1990年代前半から実験と理論で検討してきた知見に基づいて、従来、乾燥摩擦のみが用いられて来た超音波モータに潤滑剤を導入し、その高圧時と低圧時の機能の差に着目して、効率と寿命の大幅改善をめざす。これまでの超音波モータの摩擦駆動部に関する研究では、金属対樹脂、金属対金属、セラミックス対金属、セラミックス対セラミックスなどのロータとステータ振動子の材料選択に関するものはみかけるものの、乾燥摩擦を扱ったものがほとんどで、摩擦駆動面に流体を導入した研究は見当たらない。摩擦を用いるモータであるため、潤滑剤を導入することは一見、非常識な方法と考えるためと思われる。しかし、潤滑油を用いた駆動力伝達は自動車の無断変速機 (CVT) では広く実用化されている。

本研究では、潤滑剤を導入して超音波モータを動作させるための条件、潤滑剤の性質の影響、得られるモータ特性の検討などを行い、モータ特性の改善をめざす。

3. 研究の方法

図2のように、超音波振動の1周期中で、予圧 (駆動面に垂直な力) が大のときに接線方向の力伝達が最大になり、予圧が小のときには摩擦係数が最小となって不要な摩擦損失を極小化するように潤滑剤の作用が振動による予圧に応じて超音波周波数で動的に変化することを想定する。従来の超音波モータでは乾燥摩擦を利用しており、振動の1周期中で摩擦係数の変化が小さく、振動による予圧の動的変化が不十分な場合に、負の半周期で不要摩擦が発生し、損失が生じていた。これを避ければ超音波モータの効率が向上すると考えられる。

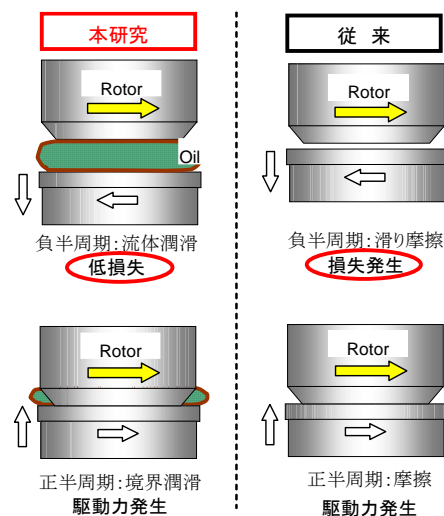


図2 超音波振動1周期中の超音波モータの動作のようす

このことを実現するために、予圧変動を生じる垂直方向の振動と駆動力を発生する平行方向の振動を独立に発生する複合振動子型超音波モータを用いて実験を行った。本研究では、図3に示す円柱型の振動子の縦振動とねじり振動を利用する回転型モータについて検討した。円柱の中心軸方向の縦振動により予圧を超音波周波数で変調し、ねじり振動を摩擦駆動面の接線方向の駆動力源としている。振動子は、2つの円柱型金属で縦振動励振用の圧電セラミックス素子とねじり振動励振用の圧電セラミックス素子を挟み、中心貫通ボルトで締め付けたボルト締めランジュバン構造とした。この振動子をその共振周波数で駆動し、片端にロータを、ボールベアリングを介して押し付けている。押し付け予圧はコイルスプリングで印加し、予圧を定量的に可変できるようにした。

本研究では、以下の項目について検討した。

- ・ 想定する動作を模擬するシミュレーションモデルの構築
- ・ 摩擦駆動部の動作の観察を行う方法の検討と動作状態の理解
- ・ 導入する油の種類等の影響の検討

- ・ 摩擦駆動部の材質・性状などの影響の検討
- ・ 進行波型超音波モータへの適用の検討

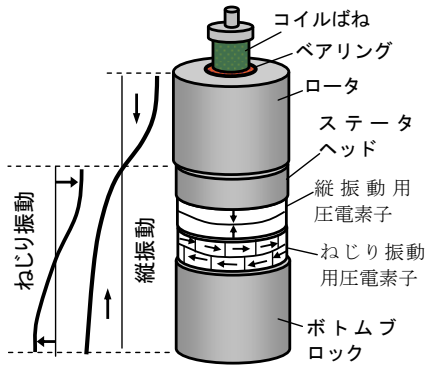


図3 実験に用いた複合振動子型超音波モータの構造

4. 研究成果

(1) シミュレーションのモデルと動作検討

ねじり振動をロータの回転運動に変換するモデルとして、図4の等価回路を考えた。ねじり振動子を基本振動の集中定数等価回路で表し、それに摩擦駆動部の特性を新たに加味している。ロータは一定回転数で回転している状態を想定し、定電流源で表現している。それと並列に摩擦駆動部の特性である素子(図中、 $?$ で表示)が接続されている。この摩擦駆動部の特性として図5を想定する。すなわち、滑り速度が小さく予圧が大きい瞬間には大きなトラクション係数となり、予圧が小さいと力がずっと小さくなる特性を設定した。これはストライベック曲線と呼ばれるものと同じである。

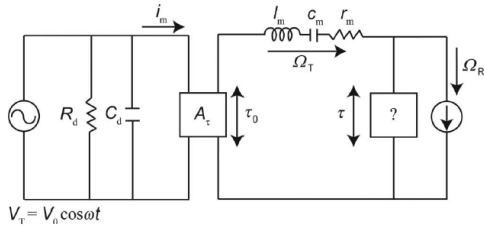


図4 超音波モータの駆動力発生等の等価回路モデル

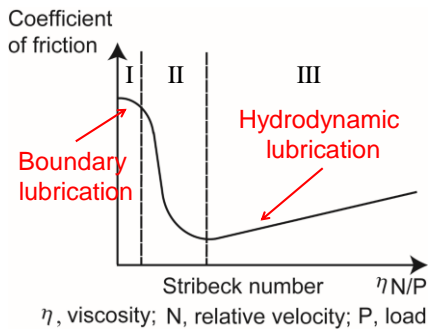


図5 摩擦駆動部に想定する特性

様々な動作条件でシミュレーションを行いモータの負荷特性や効率を検討した。ここでは、その中から本研究の目的である効率に関して、このモデルにより数値計算した結果を図6に示す。これより、図5のような摩擦特性を仮定すれば、予想通り効率が改善することが示された。しかし、乾燥状態よりも大きな予圧を印加する必要があることがわかる。なお、ここで示した効率は、ねじり振動子への入力電力に対するモータの機械出力の最大値で計算している。

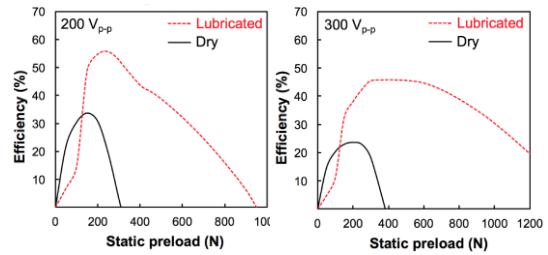


図6 モータ効率のシミュレーション結果

(2) 実験によるモータ特性の検討

モータ特性の測定は図7の測定系によって行った。振動子上面とロータとの接触面の観測法として、レーザドップラ面内振動を利用した。また、摩擦駆動面の材料として金属を用いる場合は電気抵抗の測定も行った。本研究では、主にエンジニアリングセラミックスを接触面に用いたので、それらの材料には電気抵抗の測定は利用できなかった。また、モータ出力の測定は、ロータリエンコーダで回転数を測定し、錘を巻き上げることでトルクを測定し、入力電力は駆動電圧と電流からデジタル電力計により実電力を測定した。

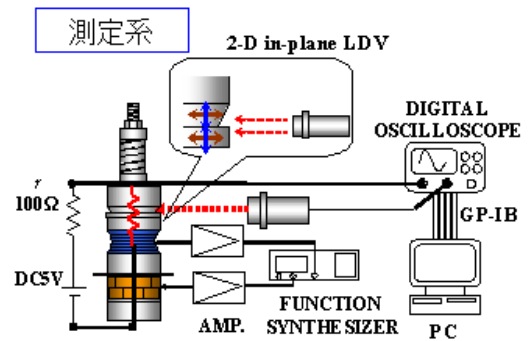


図7 モータ特性の測定系

潤滑油を用いた場合には大きな予圧を印加しないと想定した動作を実現できないことが前述のシミュレーションからわかっていたが、予圧印加力が大きくなりすぎるので、接触面積をできるだけ小さくすることとし、ロータの接触面を図8のような糸底形にした。振動子の直径は25 mmとした。潤滑油としては自動車エンジンオイルやCVT用オイル

を用いた。試験周波数は約 25 kHz である。

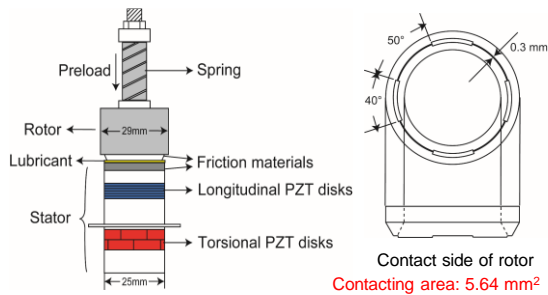


図 8 実験機とそのロータ接触面の形状

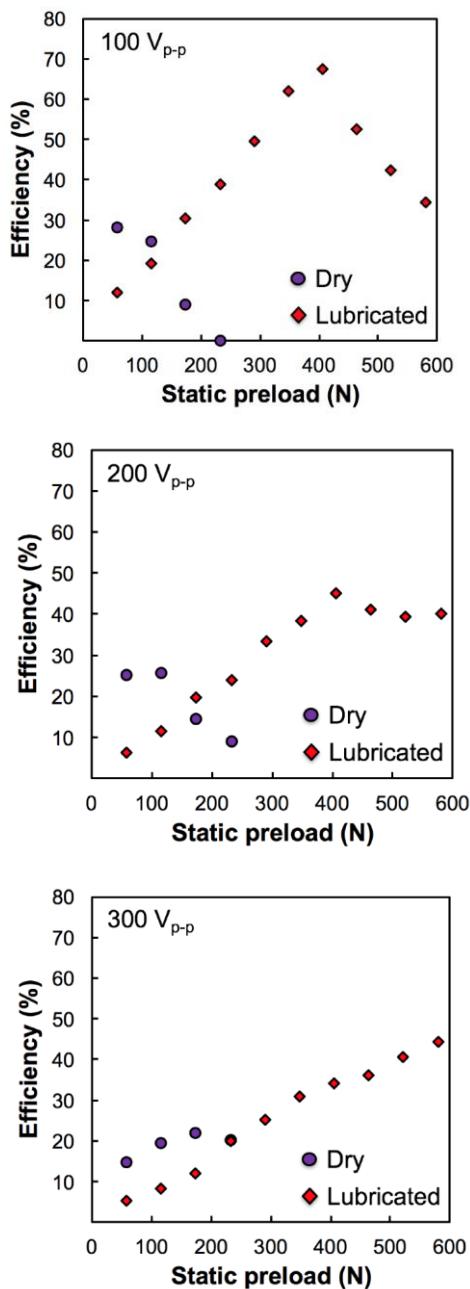


図 9 潤滑油を導入した場合のモータの効率 (印加電圧を変えた場合)

モータ効率を測定した結果を図 9 に示す。

ねじり振動子への印加電圧を 100 V, 200 V, 300 V の 3 通りについて、ばねによる静的予圧を変更して測定した。シミュレーション結果と同様、予圧をある程度以上大きくすると、潤滑剤を導入した場合に効率の大きな向上が得られている。乾燥状態で 20~30%であった効率が、潤滑することで最大で 70%程度に改善されている。また、最大トルクは図 10 のようになっている。ばねによる静的予圧を大きくしてゆくと最大トルクも大きくなるが、乾燥状態の場合は、低い予圧でロータの回転が止まってしまう。これに対し、潤滑した場合には、大きな予圧を印加してもモータは動作し、結果的に大きな出力トルクが得られている。

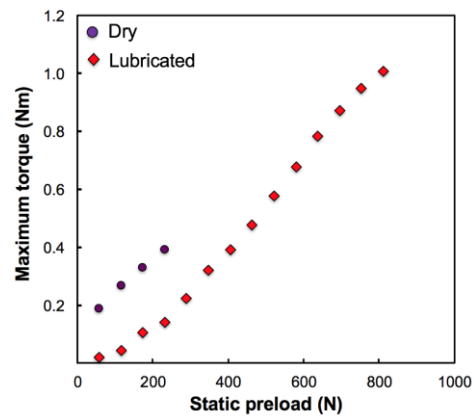


図 10 モータの最大トルク特性

この後、摩擦や潤滑に関する研究でよく用いられるピン・オン・ディスクの構造を模して、振動子先端に点接触の構造を作り、加えた潤滑油が縦振動によってどのような挙動を示すかを実測した。接触するロータとして透明ガラス円板を用い、光学干渉により油膜の厚さ測定を試みた。超音波振動に同期したストロボ法を応用することで、動的な膜厚変化を測定できると考えた。定量的な検討が可能なほどの測定信頼性は得られなかったが、定性的には、超音波振動の 1 周期の中で確かに油膜厚さが振動に同期して変化しているようすが確認できた。また、静的予圧を変えると、油膜が薄い時間の長さが変わることも観測された。これらより、想定した動作が実現されていることが確かめられたといえる。

(3) 接触部材料や潤滑油の影響

接触面は硬いことが必要とされるため、本研究ではいくつかのセラミックス材料について検討した。具体的には、アルミナ、ジルコニア、炭化ケイ素、窒化ケイ素を比較した。電子顕微鏡による表面観察を行った結果を表 1 にまとめる。本研究では、35 万回転の運転試験を行ったが、ジルコニアが良い耐久性を示した。しかし、試料によって表面の稠密

さや仕上げが必ずしも同じではなかったもので、この結果が絶対的なものであるとは断言できない。潤滑した超音波モータに用いた状態でのジルコニアの摩擦係数の実測値は 0.2 程度であった。他の 3 つの材料はこれよりも小さい摩擦係数を示した。

表 1 摩擦材料の違いによる摩耗状況

Material	Wear mechanism
Al ₂ O ₃	Microfracture
ZrO ₂	Mild wear
SiC	Severe surface fracture, material transfer
Si ₃ N ₄	Microfracture, grooves caused by debris drag

潤滑油はトラクションオイルといわれるものを試験したが、粘性を変えてもモータ特性に大きな影響は出なかった。また、同じ粘性であっても高トラクション用として開発された潤滑油は滑り量が少なく、わずかに良い特性を示した。

(4) 進行波型超音波モータへの適用結果

これまで述べてきたように複合振動子型超音波モータでは潤滑油の導入によって明らかな特性の改善が得られた。そこで、これまで広く実用化されている超音波モータの方式である進行波型についても潤滑油の導入実験を行った。図 1 1 に示すような 7 次たわみ振動モードで動作するジルコニア製ステータ振動子を製作した。直径は 60 mm であり、共振周波数は約 53 kHz である。

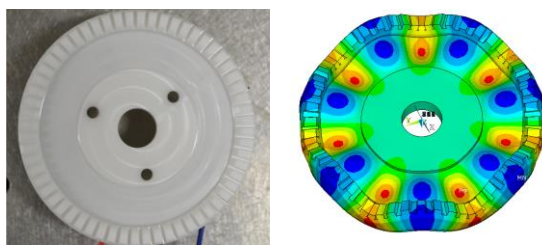


図 1 1 進行波型超音波モータのジルコニア製ステータ振動子（左）と振動モードの有限要素解析結果（右）

この構成では、潤滑油を導入すると図 1 2 のようにモータ効率は低下した。予圧を少しずつ増してゆくと、最大トルクも大きくなってゆくが、あるところを超えるとそれ以上トルクが増えなくなってしまった。これは、静的予圧が大きくなるとステータ振動子のたわみ振動が抑圧されてしまうためであることがわかった。つまり、円板のたわみ振動を用いた場合、大きな予圧をかけることはできず、潤滑剤が有効に作用するような高予圧下では十分に動作させることができないといえる。円板進行波型で潤滑油を有効に活用するには、接触面積をより制限するなどして予圧を与える力は小さくしても、単位面積当た

りの接触圧力を大きくする必要がある。この形式の進行波型への提案手法の適用は今後の課題である。また、同じ進行波型でもボルト締めたわみ振動子を用いる方法は高い静的予圧にも耐える可能性があるため、その方式への潤滑油の導入も検討する価値がある。

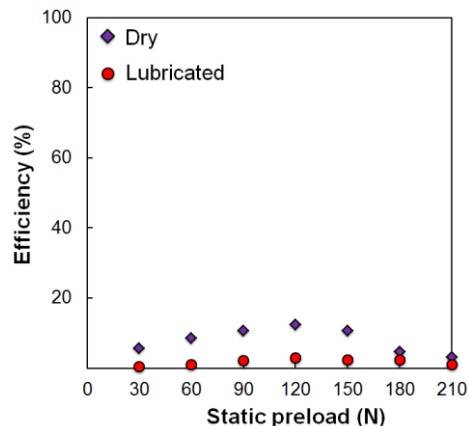


図 1 2 たわみ円板による進行波型へ提案手法を適用した場合のモータ効率

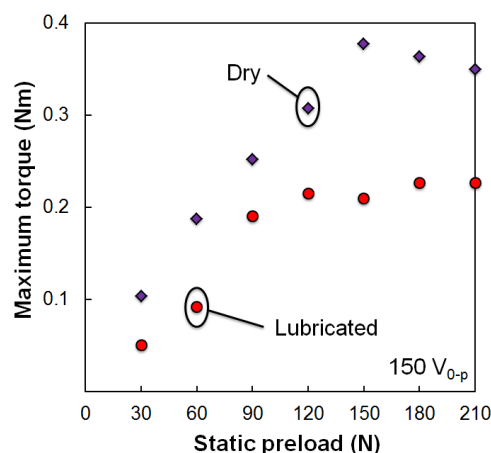


図 1 3 たわみ円板による進行波型へ提案手法を適用した場合の最大トルク

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① Wei Qiu, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Tribological performance of ceramics in lubricated ultrasonic motors, *Wear*, 査読有, vol. 352-353, 2016, pp. 188-195.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.006>

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① Wei Qiu, Kentaro Nakamura, Fundamental Characteristics of lubricated ultrasonic motors, 電子情報通信学会技術報告, US2016-70, 2016, 査読無, pp. 53-58.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 健太郎 (NAKAMURA, Kentaro)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号：20242315

(2) 研究協力者

Wei Qiu
Technical University of Denmark
Post-doctoral fellow