

# 高効率化のための低摺動リニア超音波モータの開発

## Design of a Slip-Free Linear Ultrasonic Motor for Efficiency Improvement

○学 戸枝誠 (慶大) 正 前野隆司 (慶大)

Makoto TOEDA, Keio university  
Takashi MAENO, Keio university

We suggest the method to reduce the slippage between stator and slider of a linear ultrasonic motor. Ultrasonic motors have problem of low efficiency with friction contact and short life by abrasion. This study makes the vibration on stator's surface "constant tangential velocity while the stator is in contact with the slider" by adding another vibration whose frequency is three times higher compared with basic vibration. Considering to combine plural vibration mode, I turned up that it is the best to combine the first and the third vibration in order to reduce fluctuation in the tangential velocity of stator surface while the stator contacts the slider. Contact with reduced slippage should raise efficiency of an ultrasonic motor. This also means small abrasion of stator and slider to prolong the available period.

*Key words:* Supersonic Wave, Actuator, Piezo-element, Finite Element Method, Wear,

### 1. 緒言

超音波モータは、小型化が容易、高推力、非駆動時の通電が不要、磁界変化の大きい環境下で動作可能といった近年のニーズに合った長所を有する[1]。このため、超音波モータは小型精密機械のアクチュエータおよび次世代のアクチュエータとして期待されている。しかし、超音波モータは振動子と移動子の摩擦力によって駆動されるため、摩擦損失によって摩擦駆動効率が上がらない、モータの磨耗により、寿命が短くなるという短所を有する。したがって、すべりによる磨耗を軽減し、長寿命化および高効率化を図ることが超音波モータの重要な課題である。本研究では、超音波モータの高効率化を目指し、移動子・振動子間の接触状態を低摺動とするための、リニア超音波モータの駆動方法および振動子形状を提案することを目的とする。

### 2. 低摺動駆動法の提案

#### 2.1 駆動原理および問題点

超音波モータは超音波振動を利用して駆動するモータである。超音波振動を励振する振動子と駆動される移動子から成る。振動子の固有振動モードを用いて振動子表面に楕円運動を発生させ、そこに移動子を加圧接触させる。移動子は摩擦力を介して駆動される。

楕円運動においては楕円上の位置によって接線方向の速度が変化する。しかし、移動子の速度は一定である。このため、移動子と振動子接触部の間に接線方向速度差が生じる。この

速度差により、移動子、振動子接触部にすべりが生じ、超音波モータの効率低下、磨耗による短寿命化が生じる[2]。

#### 2.2 提案する低摺動駆動方法

移動子・振動子間のすべりが生じない条件は、移動子と接している時間内において、振動子の接線方向の速度成分が一定になることである。このため、定在波型超音波モータでは、接線方向速度が矩形波形、すなわち、図1に示すように、接線方向変位が三角波形となる振動を励振すればよいと考えられる。

三角波を励振するには、フーリエ級数に従い $(2n+1)$ 次の振動を合成すればよい。合成する正弦波を選定するため、振動子と移動子が接している範囲において、接線方向速度のばらつきが小さくなる振動の組合せを調べた。この際、各振動の振幅比・位相差を調節し、その振動の組合せにおいて、最も接線方向速度のばらつきが小さい時の評価値で比較した。表1に示すように、2つの振動を合成することによって、接線方向速度のばらつきを十分小さくできることを確認した。また、2つの振動を組合せた場合の接線方向速度のばらつきを比較を行った。表2より、1次と3次の振動を合成した場合において、最も接線方向速度のばらつきが小さくなる。したがって本研究では、最も効果的に接線方向速度のばらつきを軽減できる1次振動と3次振動を合成することにする。本研究では、角柱振動子を有し、縦振動と曲げ振動によって駆動する定在波型リニア超音波モータを設計する。したがって、送り振動として励振する振動は縦1次・縦3次合成振動とする。

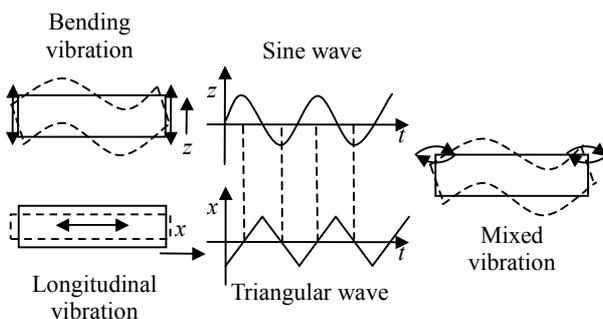


Fig.1. Waveform which a sine wave and

Table 1 SD of tangential velocity to number of mixed modes

Mode degree	1st	1st+3rd	1st+3rd+5th
Standard deviation	$1.52 \times 10^{-1}$	$3.92 \times 10^{-2}$	$4.88 \times 10^{-3}$

Table 2 SD of tangential velocity to each combination of two modes

Mode degree	1st+3rd	1st+5th	1st+7th
Standard deviation	$3.92 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-1}$	$1.39 \times 10^{-1}$

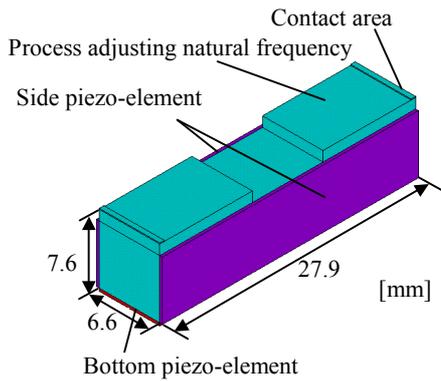


Fig. 2 Invented shape of stator

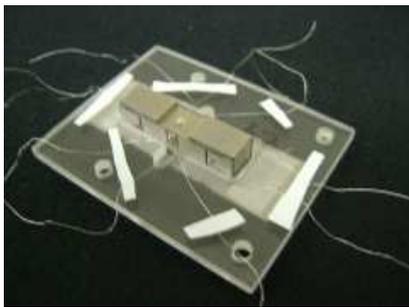


Fig. 4 Picture of manufactured stator

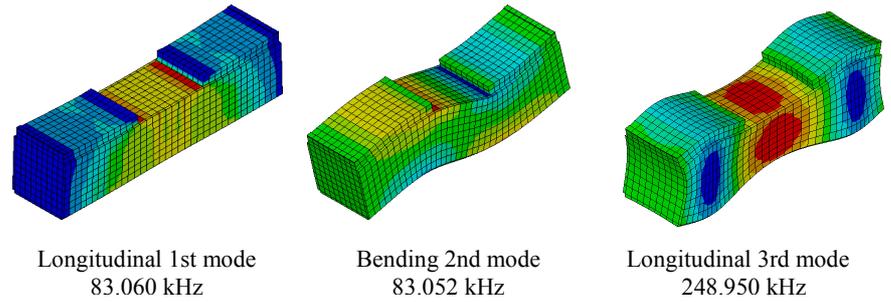


Fig. 3 Shape of stator vibration at each natural frequency by FEM simulation

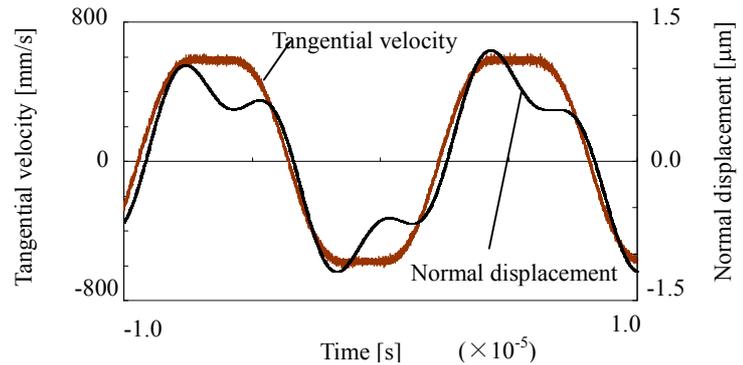


Fig. 5 Tangential velocity and normal displacement-time diagram of developed USM

### 3. 設計・製作

提案する手法を実現するためには、角柱状振動子の縦1次モードと縦3次振動モードの固有振動数比が1:3となり、かつ縦1次モードと曲げ2次モードの固有振動数が一致する必要がある。本研究では、振動数の調節を行うため、振動子の両端部に振動数調節用突起を設けた。移動子に一定方向の力のみを伝えるために、接触点を両端の2点のみとした。振動子の両端以外が移動子と接触しないために、振動数調節用突起の上に突起を設け、移動子との接触部とした。

以上のような条件のもとで、有限要素解析を用いて設計した振動子形状を図2に示す。また、圧電素子の配置は以下の通りである。底面圧電素子は曲げ2次モードを励振するために配置した。側面圧電素子は縦振動を励振するために配置した。また、駆動時の接線方向速度を測定するために、圧電素子にセンサ相を設けた。

それぞれの振動モードのアドミタンスおよび共振周波数を、有限要素法を用いた圧電解析により求めた。この結果、十分なアドミタンスが得られ、各振動モードの共振周波数が提案する手法で求められる条件を満たした。振動子の固有振動モードを図3に示す。

振動子に圧電素子を接着し、圧電素子の電極に導線を接着した。完成した振動子を図4に示す。

### 4. 製作した振動子の評価

製作した振動子の、各振動モードにおける固有振動数、アドミタンス、Q値を測定した。設計条件に従い、縦1次振動の固有振動数：縦3次振動の固有振動数が1:3、縦1次振動と曲げ2次振動の固有振動数が一致していることが確認された。また、アドミタンスは電流の流れやすさを表し、Q値はそれぞれの共振の鋭さを表す値である。各振動モードにおいて、アドミタンスは20~40 mSであり、Q値は3400~3800であった。高いアドミタンスおよびQ値を得ることができたため、この振動子で

大きな振幅を得ることが可能であると確認できた。

続いて、提案する手法で超音波モータを駆動する際の振動を合成した際の接触点の振動状態を測定した。加圧力に応じて、接触点は一定値以上で移動子と接触する。このため、提案する手法では、振動子の接触点が一定値以上の鉛直方向変位を持つ範囲内で、接線方向速度が一定となることが求められる。図5に示す振動は、鉛直方向変位が一定値以上の範囲において、接線方向速度が矩形波に近づいた事が確認できる。送り速度が正弦波である振動と比較して、接線方向速度のばらつきが軽減されていることがわかる。これにより、提案した手法の、低摺動駆動方法が可能であることが確認された。

### 5. 結論および今後の展開

超音波モータの高効率化をめざし、超音波モータの送り振動速度を矩形波形に近づける手法を提案した。実用的な方法として、送り速度が一定となる振動を生成するために、超音波モータの送り振動に基本振動とその3倍の振動数を持つ振動を加えることが最も効果的であることを確認した。設計した超音波モータを駆動し、送り速度が一定となる振動が実現されていることを確認できた。これにより、提案手法が実現可能であることが確認できた。

今後は、製作した振動子を用いて駆動実験を行う。提案する手法による駆動を従来の手法による駆動と比較し、効率、磨耗の変化を測定することで、提案する手法の効果を確認する。

### 文献

- [1] 前野, 超音波モータ, 日本ロボット学会誌 Vol. 21, No. 1, pp. 10-14 (2003)
- [2] 前野隆司, 中川洋祐: 超音波モータのトライボロジー, 月刊トライボロジー, No.188, 51-53 (2003)