

超音波モータのトライボロジ

前野 隆司

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 助教授

中川 洋祐

慶應義塾大学 大学院 前期博士課程

1. はじめに

超音波モータ⁽¹⁾は、数あるモータ・アクチュエータの中でも最もトライボロジに関係深いアクチュエータであるといえよう。超音波モータの技術課題はトライボロジそのものと言っても過言ではない。なぜなら、超音波モータは接触に伴う摩擦力を介してロータやスライダを駆動する摩擦駆動型アクチュエータだからである。このため、超音波モータにおける最大の技術課題は、磨耗を減らし耐久性を向上させることである。特徴的な点は、一般の摺動材料と違って、摩擦係数が大きく、かつ、磨耗しにくい、一見矛盾した特性をもつ摺動材料が求められるという点である。

本解説では、超音波モータの原理と特徴を述べた後に、トライボロジと最も関係のある特性、す

なわち、振動子（ステータ）と回転子・直進子の摩擦接触状態がモータの特性に及ぼす影響について述べる。

2. 超音波モータの原理と特徴

超音波モータは、振動子の振動エネルギーを摩擦力を介して回転子（ロータ）の回転（または直進子（スライダ）の直線運動）に変換するアクチュエータであり、低速高トルク、高保持トルク、静粛といった特徴を有する。超音波モータは一般に進行波型と定在波型に分類される。進行波型には、図 1 および図 2 に示したリング型や、図 3 に示した棒状のモータがある。

リング型を例に、駆動原理を説明しよう。図 1 は、一眼レフカメラに用いられているキヤノン^(株)のリング型超音波モータの斜視図である。直径 70 mm の振動子の下面には圧電素子が貼付され、振動子上面には変位拡大のための突起が設けられている。回転子には、あとで述べるように振動子の波面に沈み込むように変形するための金属製フランジ状ばねが設けられている。（フランジ状ばねの代わりに樹脂材料を用いる超音波モータも多い。）圧電素子に約 30 kHz の交流電圧を印加すると、振動子には 7 次の曲げ進行波が励起される。図 2 は、図 1 の振動子・回転子の部分展開図である。振幅 1 μm 程度の右向き進行波が振動子に励起されると、突起上の点 P には反時計回りの楕円振動が生じ、点 P と波頭で接触した回転子は左側に 180 mm/s 程度の速度で移動する。この超音波モータの無負荷回転数は 60 rpm、最大トルクは 1.5 kgfcm 程度である。

図 3 の棒状超音波モータはニューテーションモ

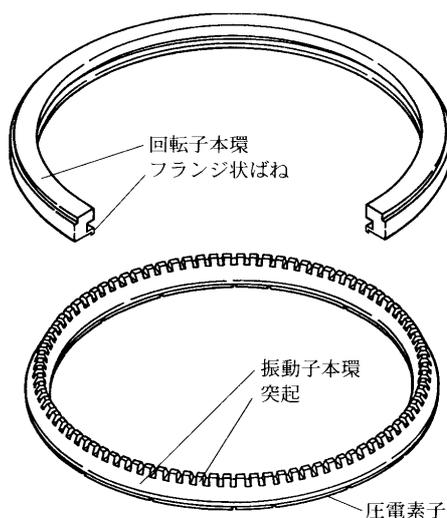


図1 リング型超音波モータ斜視図

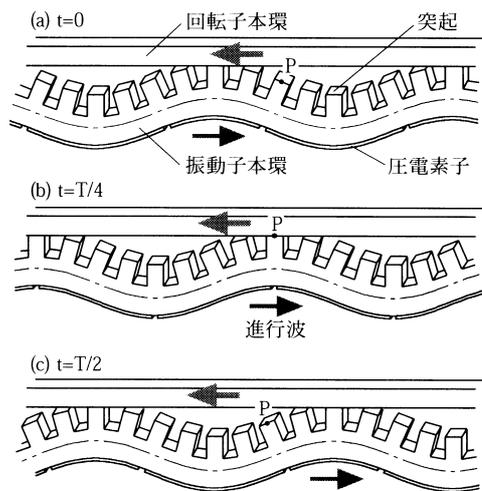


図2 リング型超音波モータの部分展開図を用いた駆動原理の模式図

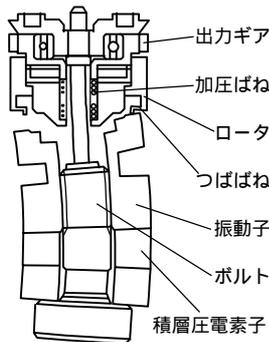


図3 棒状超音波モータの断面図

ータの一種である。振動子には直交した 2 つの曲げ 1 次モード（図 3 の右側の図の振動と、相似形で紙面に垂直な方向の振動）が励振される結果、振動子の頭部には首振り運動が生じる。接触面から見ると、首振り運動も進行波であるので、接触面には楕円運動が生じ、回転子は首振り運動と反対向きに回転する。棒状超音波モータの場合にも、回転子にはフランジ状つばばねが設けられており、振動子の振動に沈み込むように接触している。

定在波型超音波モータには、2 つの振動を重畳して接触部に楕円運動を生成する 2 相駆動型と、1 つの振動によりキツツキのような往復運動を生成して対象物を移動させる 1 相駆動型とがある。定在波型の場合にも、回転子・直進子には沈み込みを持たせるための弾性材料が不可欠である。

この沈み込みが、超音波モータの性能を左右する重要なパラメータである。実は、タイヤが地面

と接触する場合や、ゴムローラで紙を送る場合とよく似ており、沈み込んで接触している部分に固着（付着、stick）領域と滑り（slip）領域が分布している。固着領域では振動子の表面は回転子（直進子）をがっちりとグリップしているが、滑り領域では相対速度と摩擦力の積に比例する摺動損失が生じ、磨耗の原因にもなる。このため、接触部をどのような状態に保つか、超音波モータの性能を左右する重要なポイントなのである。このため、次章では、進行波型と定在波型（1 相駆動型）超音波モータの摩擦接触状態と特性の関係について説明する。

3. 超音波モータの接触状態と特性の関係

筆者らは、超音波モータの接触部における微小な沈み込みを線形ばねによってモデル化し、クーロン摩擦の原理を用いて定常駆動時における振動子・移動子（回転子または直進子）間の接触解析を行う手法を提案した⁽²⁾。本章では 2 相駆動型（進行波型または 2 相定在波型）と 1 相駆動型における接触部軌道の違いに着目し、接触解析に基づいて両者の駆動特性を比較する。

接触解析によって計算した、摩擦力および固着・滑りの履歴を図 4 および図 5 に示す。図 4 は 2 相駆動型、図 5 は 1 相駆動型における解析結果であり、(a)は振動子接触部と移動子表面の法線方向変位、(b)は移動子が振動子から受ける反力、(c)は接触部の接線方向速度の履歴である。振動子上の点は移動子と間欠的に接触し、接触領域において固着と滑りを繰り返しながら移動子を駆動している。固着が生じているときは振動子は移動子をはがっちりとグリップするため接触部での速度は等しくなり、移動子が受ける摩擦力は最大摩擦力以下となっている。一方、接触部に滑りが生じると、振動子と移動子の速度は異なり、移動子が受ける摩擦力は最大摩擦力と等しくなっている。2 相駆動型と 1 相駆動型でこれらの履歴は異なり、このためそれぞれの駆動方式における固着と滑りの重要性は異なる。つまり、2 相駆動型は滑り領域によって推力を得ているのに対し、1 相駆動型では固着領域によって大きな推力を得ている。このことから、2 相駆動型では滑りが生じやすい接触状態、1 相駆動型では固着が生じやすい接触状態で駆動することが望ましい。

更に、図 4、5 の(a)における移動子表面の位置 h

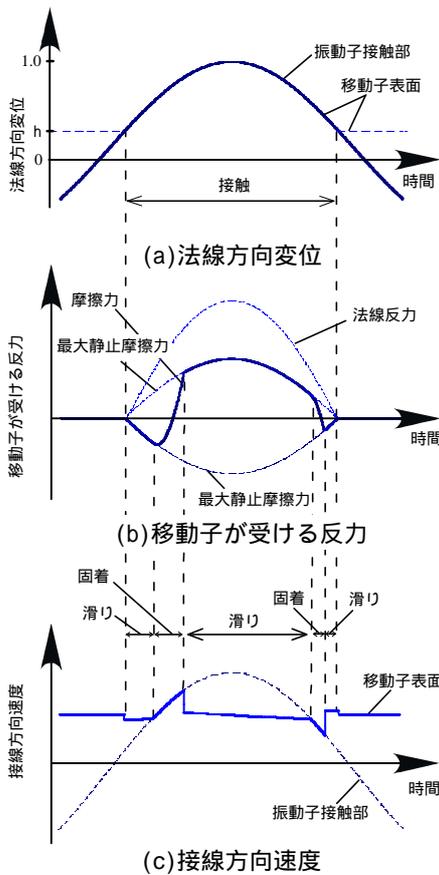


図4 2相駆動型超音波モータにおける接触状態の履歴

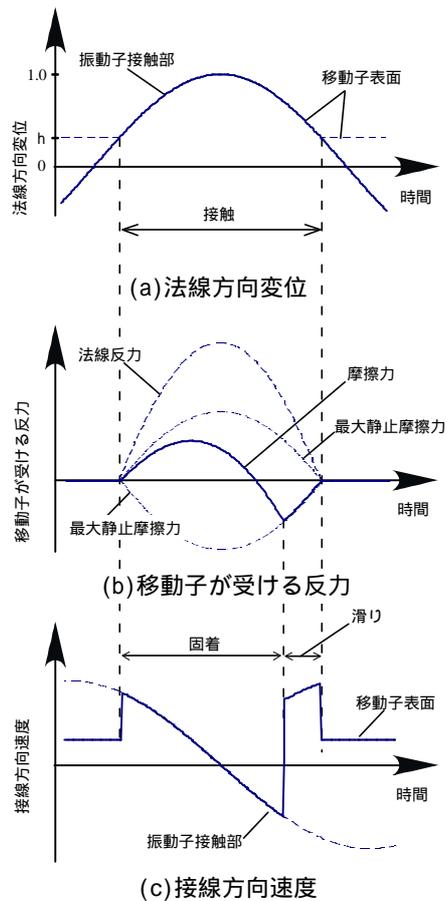


図5 1相駆動型超音波モータにおける接触状態の履歴

を変化させることによって振動子・移動子間の沈み込み量を変化させた場合の駆動特性の変化を図6に示す。図6に示すように、2相駆動型では、沈み込み量の増加に伴って速度および摺動効率は減少する。一方、1相駆動型は沈み込み量の増加に伴って速度が増大し、摺動効率にはほとんど変化が生じない。よって、2相駆動型では沈み込み量が小さいとモータの特性が向上するのに対し、1相駆動型では沈み込み量を大きくするとモータの特性は向上する。

このように、超音波モータは駆動方式の違いによって、その駆動特性も全く異なったものになる。このため、超音波モータの特性向上のためには、その駆動方式に応じて接触部に適切な弾性材料を配置し、振動子・移動子を適切な加圧力で押し付けることによって、振動子と移動子に最適な接触状態を実現することが重要である。

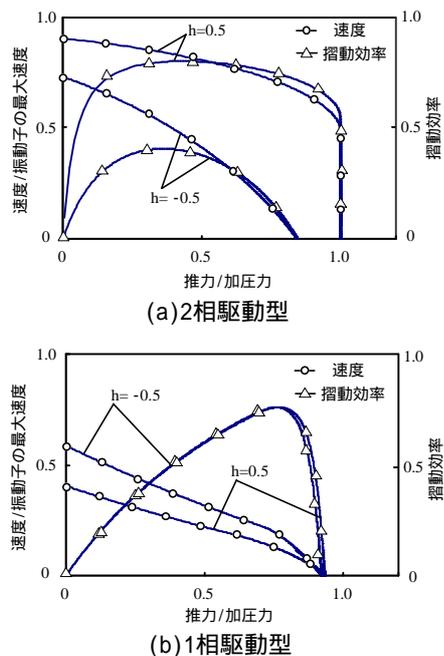


図6 沈み込み量と駆動特性の関係

4. おわりに

超音波モータは、従来の電磁モータにはない優れた特性により、精密位置決めや複雑な運動を生成するアクチュエータとして、様々な用途での応用が期待されている。しかし、既存の超音波モータには、効率や耐久性の面で問題が残されている。このため、接触部の摩擦駆動機構の解析によって超音波モータの優れた特性を最大限に発揮できれば、超音波モータの用途は更に拡大していくものと思われる。今後は、解析結果を考慮した最適設計および制御法の確立を行い、超音波モータの更なる応用展開を図っていく必要がある。

参考文献

- (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, 固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析, 日本音響学会誌 Vol. 54, No. 4, pp. 305-311 (1998)