

## 超音波モータの30年とこれから

東京工業大学 中村 健太郎

### 1. はじめに

超音波モータは圧電素子で発生した超音波振動でロータやスライダを擦って動かすモータである<sup>(1)</sup>。電磁力で動作する従来型モータとは構造・動作原理が全く異なり、その特性も異なっている。高いトルクや推力が得られるため、ギアによる減速が不要であり、応答が速い。また、電力供給を止めれば、外部ブレーキ機構無しで摩擦力のために位置が保持される。このことは、位置決め用途では総合的にみて低消費電力であることになる。電磁モータに比べると電磁ノイズ放射が小さい、非磁性化が可能であるなどの特徴も有している。ギアレスであることは低騒音であることも意味する。また、電磁モータでは実現しにくい円板型やリング型の実現が可能である。一方、高周波電源が必要であるため単純用途にはコストがかかることや、摩擦駆動であるための摩擦が避けられないことがデメリットとなる。

振動でものを動かすというアイデアは古くからいくつかあるが、現在までに実用化されている超音波モータにつながる研究開発は1980年前後に日本で始められた。本誌が創刊されたころは日本企業による超音波モータの開発や応用試験が華やかであったころである。その後、カメラの自動焦点合わせを中心に、顕微鏡ステージや半導体製造装置、ロールカーテンなどへの応用が進められ、さまざまな方式が開発されたことは本誌の記事でも繰り返しとりあげられているとおりでである。

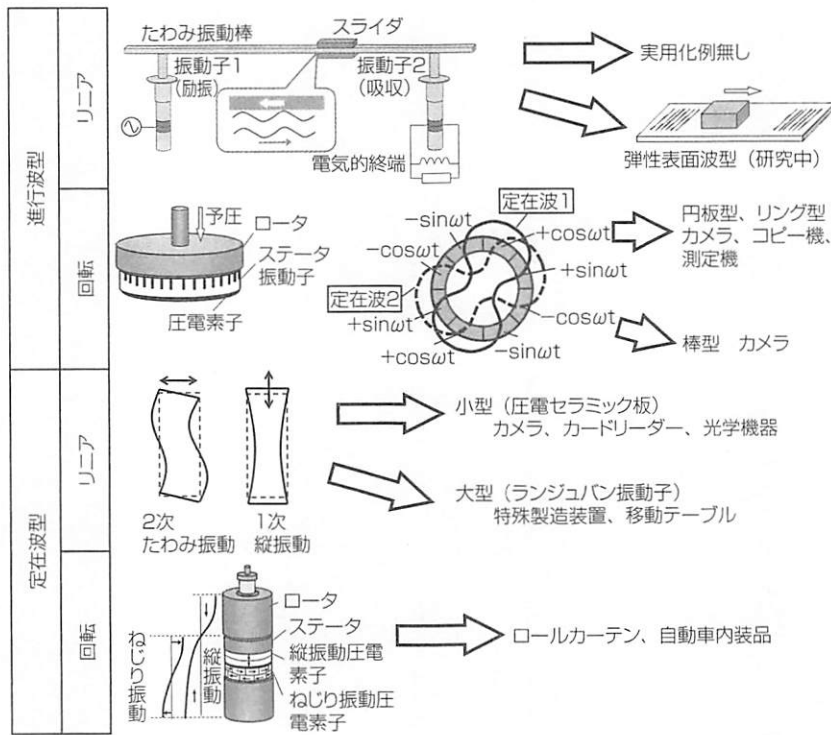
### 2. 超音波モータの方式

超音波振動でロータやスライダを摩擦駆動するには、振動軌跡を円または楕円にする必要がある。こ

の楕円振動軌跡を得るために大きく分けて進行波を用いる方式と定在波を用いる方式がある。第1図に超音波モータの各種方式をまとめた。

進行波型では、固体に進行波の振動が伝わる際に発生する固体表面の楕円振動軌跡を利用している。リニアモータでは、第1図上のように、金属棒の両端に振動子を接続し、それらの振動子の一方を駆動用(振動子1)、もう一方を吸収用(振動子2)とすることで金属棒に進行波を励振している<sup>(2)</sup>。回転モータでは、定在波振動で発生位置が1/4波長だけずれたものを90度の位相差で駆動することで、振動モードを回転させて擬似的に進行波を発生している。このために、圧電素子の電極を分割して位相差90度の2相あるいは4相電源で駆動する。進行波リニアモータの実用化例はまだ無いが、回転型はカメラのオートフォーカス機構などで実用化されている。回転型では1~5 kgf·cmの静止トルク、毎秒1~数回転の無負荷回転数、最大効率20~50%という性能を示している。

一方、定在波型では振動方向が直交する2つの振動モードを90度の位相差で駆動して楕円振動軌跡を作り、それによってロータやスライダを摩擦駆動する。矩形の圧電素子の1次縦振動モードと2次たわみ振動モードを組み合わせたものがいくつか開発されており、光学機器などにおいて実用化例がある<sup>(3)</sup>。強力なランジュバン型振動子により大出力化したものも開発されており、一部は大型移動ステージ用などで少量生産された実績もある。直径40 mmの振動子を用いて最大推力10 kgf、無負荷速度0.5 m/sという試作例が報告されている<sup>(4)</sup>。このような定在波の組み合わせはバリエーションに富んでおり、これま

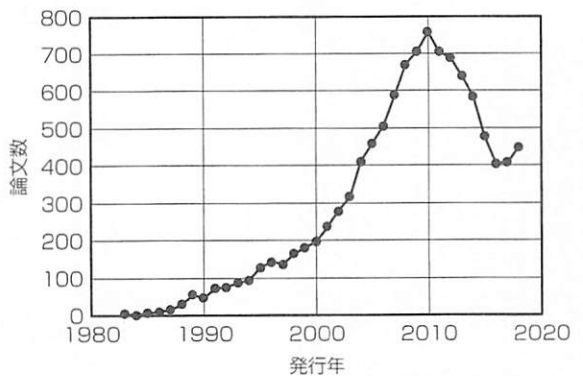


第1図 超音波モータの分類とその応用先

でにさまざまな方式が提案されている。回転型では、縦振動とねじり振動の組み合わせが最も多く検討されている。直径5 mmの小型のものから直径120 mmのものまで試作例があり、直径120 mmのものでは最大トルク400 kg・cmを記録している。直径25 mmのものが大型ロールカーテン用として生産された実績がある。また、縦-ねじり変換器を用いた定在波型は、自動車内装品として短期間ではあるものの、実際に搭載されたことがある。

### 3. この30年の研究推移

インターネットを用いて、検索ワード“ultrasonic motor”で検索すると約3,140万件、“piezoelectric motor”で390万件、“超音波モータ”で470万件がヒットした(本稿執筆当時:2019年1月)。次に、文献検索サイトGoogle Scholar<sup>5)</sup>によって、この30年に出版された論文数を年ごとに調べてみた結果を第2図に示す。ここで、検索条件は題目または本文に“ultrasonic motor”が含まれるものとし、特許は除外した。指田による超音波モータに関する最初の論文が応用物理に掲載されたのが1982年であるが<sup>6)</sup>、その



第2図 超音波モータに関する論文数の推移

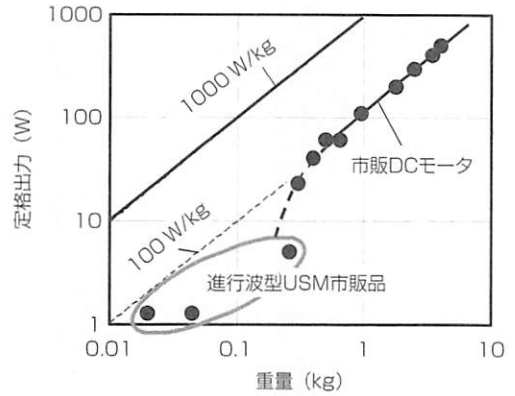
ころから論文が出始め、1985年から15年は毎年12本ずつぐらいのペースで論文が増えていることがわかる。その後、2010年までは毎年60本近い増加率で論文数が急増している。これは中国からの論文が増えたためと思われる。重要な基本事項はほぼ1990年前半までに出そろっているが、1990年前後までに多くの日本企業が超音波モータの開発や応用探索を行い、特許も多数出されている。日本、中国以外では、初

期にはスイス、フランス、イタリアなどでも超音波モータ研究が行われた。ドイツにも有力な研究者がいる。また、イスラエルには超音波モータを供給している企業がある<sup>(7)</sup>。米国ではマイクロマシンの創成期に微細加工技術(MEMS技術)を使った超音波モータが研究され、現在でも研究を続けているグループがある。中国の超音波モータ研究者は多くが、南京航空航天大学にはResearch Center of Ultrasonic Motorsが設けられた。第2図をみると、2010年を境に論文数が減少しているが、ここ1、2年、再び増加に転じているようにも見える。

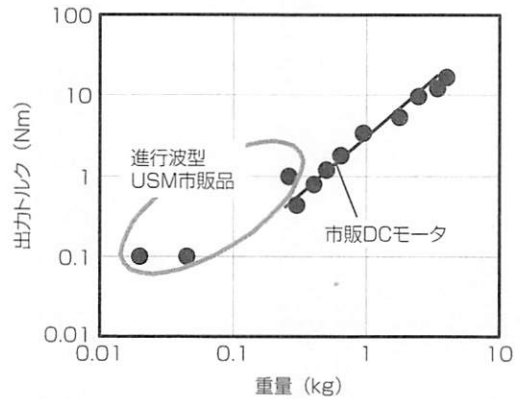
#### 4. 超音波モータの可能性

圧電セラミックスによる超音波振動子は単位重量当たりの音響出力であるエネルギー密度が高く、それを超音波モータとして機械出力に反映できれば小型高出力なモータが実現できると期待される。これが超音波モータの開発のモチベーションのひとつである。機械加工、接合、洗浄などパワー用途で広く使われているランジュバン型振動子の単位重量当たりの許容入力電力はメーカーカタログなどをみると500~1000 W/kgである。圧電セラミックス振動子は負荷機械インピーダンスを適切に選べば最大変換効率は95%を越えるので、許容入力電力に近い音響出力が取り出せ、エネルギー密度が高い。市販の進行波型超音波モータの定格出力とDCサーボモータの定格出力を第3図に示す。現在の超音波モータの出力はランジュバン型振動子の出力の1/10以下であることがわかる。電磁型モータは小型化すると100 W/kgよりもパワー密度が急に悪化するが、超音波モータではその領域で有利であるといえる。MEMS技術を使った直径1 mm以下の超音波モータの報告例があるが、実際の応用面では、電磁型モータで実現しにくい直径1~5 mmが超音波モータの役立つ領域のひとつと考えられる。一方、モータ重量に対する出力トルクを比べると、第4図のように超音波モータのほうが大きい。

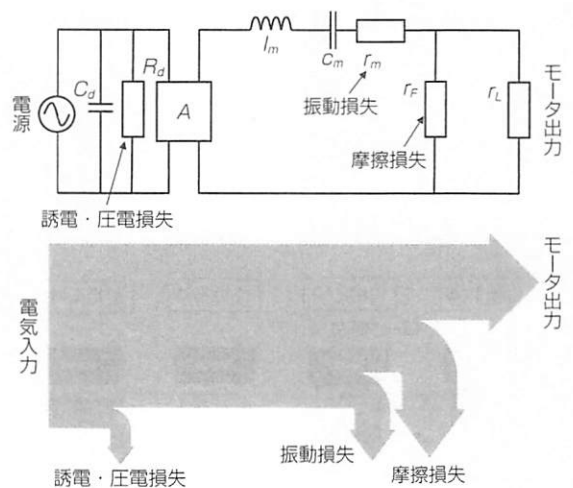
超音波モータでは、入力電力が消費される先として、誘電体損失など圧電素子の性質にかかわる損失、高振幅振動による振動子の機械損失、そして、摩擦駆動面での滑りによる摩擦損失がある。これを第5図にまとめた。圧電素子の機械損失は振動振幅



第3図 モータの重量と定格出力



第4図 モータの重量と出力トルク



第5図 超音波モータにおける損失・出力の内訳

依存性が大きく<sup>8)</sup>、超音波モータで利用する高振幅領域では、機械的Q値が、圧電セラミックス材料のカタログに示された値の半分以下になってしまう。振動子の機械インピーダンスと負荷インピーダンスの整合が悪い条件下ではこの損失が大きくなる。高出力なランジュバン振動子を用いた場合など、このことをよく検討する必要がある。しかし、効率50%以下のこれまでの超音波モータでは、振動から摩擦を介してロータの運動に変換する際の損失が支配的である。このため、超音波振動子本来の能力をモータ特性に反映できていない。これが改善できれば超音波モータの応用範囲はさらに拡大すると考えられる。

### 5. 特性改善の試み

前節で述べたように、摩擦駆動部の損失を減らすことが超音波モータの特性改善につながる。第1図の最下段にある定在波型の回転モータである複合振動子型の動作を第6図に示す。振動の1周期を4分割してある。位相2/4のときにねじり振動が最大になり、同時に縦振動変位が最大になっており、この瞬間にロータがねじり振動によって摩擦駆動される。ここで滑りが少ない必要があることはもちろんである。一方、縦振動の振動振幅が不十分であると、位相4/4のときにロータと振動子が完全には離れず、大きな摩擦損失が発生してしまう。そうすると効率が50%を下回る。従って、十分強力な縦振動が必要になる。しかし、振動の半周期以上に渡ってロータと振動子が離れるような縦振動の実現はなかなか難しい。また、仮にそのような状態が実現されても、ロータと振動子が接触している時間はゼロにはできず、一定速度で回転するロータと正弦波振動

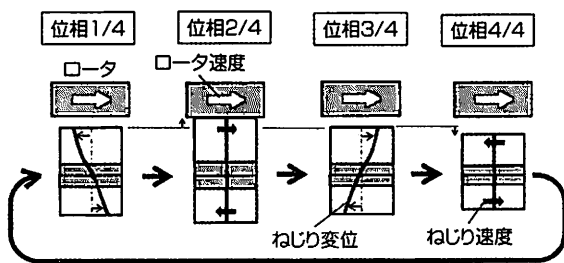
する振動子の間には必ず滑りが生じる。この損失を減らすために、ねじり振動速度を正弦波ではなく矩形波に近づけることによって滑り損失を減じた研究もあるが<sup>9)</sup>、振動子の設計が複雑になる。

一方、摩擦駆動部に潤滑油を用いるという方法が研究されている。油を介して駆動する方式は、トラクション・ドライブとして自動車の無段変速機 (CVT) において実用化されて久しい。これに近い動作を超音波モータの駆動面でも実現しようという研究であり、油を用いて効率を高められることが複合振動子型超音波モータについて報告されている<sup>10)11)</sup>。油を用いて駆動力を高めるには高い予圧が必要であり、予圧によって振動が抑圧されやすい薄型のたわみ振動板を用いる進行波型では成功していないため、実用化はされていない。

このような新しい試みの他に、従来の乾燥摩擦状態でも、駆動方向や予圧方向と直交する振動成分を十分無くするような緻密な振動子設計やロータの接触部の機構設計の見直しといった地道な改良を続ける必要がある。カメラ用などでの製品化は、これらの検討が相当程度行われた結果と考えられる。また、予圧印加機構をいかにコンパクトで安定なものにするかといった設計も実用上たいへん重要である。接触部の摩擦はある程度避けられないので、ある変位領域では発生力が一定な非線形ばねなど専用部材の開発が行われている。また、軽量化の試みとしては、振動体を金属ではなくポリマーに置き換える研究例もある<sup>12)13)</sup>。

### 6. おわりに：まとめ

1980年代に実用開発が始まった超音波モータであるが、その当期待されたほどの広範囲な応用がその後に展開されたとはいえない。ファックスやプリンタ、コピー機への応用、自動車内装品への応用はかなり具体的に検討されたが、結局、ほとんど実を結んでいない。これらの用途では、安価でパフォーマンスに富む製品が多数あり、駆動回路や制御回路といった周辺部分も専用ICが様々準備されている従来型モータの牙城を崩すことはできていない。しかし、カメラの自動焦点合わせ用途は、その形状や動作特性、静粛さが要求に合致しているのと熱心な開発のために実を結んだ。また、電磁型モータでは



第6図 複合振動子型超音波モータの動作

どうしても対応できない磁場を嫌う用途には、少数ではあるが使われているようである。今後はロボットやパワースーツ、医用機器などがターゲットとなるが、それらの用途ではトルク重量比の改善が必要である。また、そのような用途に多自由度超音波モータも検討されている。すなわち、多数の振動モードの組み合わせにより、楕円振動軌跡の振動面を三次元の任意の向きに設定できるようにし、ボール形状のロータを $x$ 、 $y$ 、 $z$ の三つのどの軸の回りにも回転できる。多数の電磁モータを組み合わせるよりコンパクトに多自由度運動を実現できるため<sup>(14)</sup>、ロボットの腕、指などのためのアクチュエータとして期待される。超音波モータに関する解説として、文献(15)~(17)も参照されたい。

#### <参考文献>

- (1) S.Ueha and Y.Tomikawa: 'Ultrasonic motors theory and applications', Oxford Science Publications, New York (1993)
- (2) M.Kuribayashi, S.Ueha and E.Mori: 'Excitation condition of flexural traveling waves for reversible ultrasonic linear motor', *J. Acoust. Soc. Am.*, 77, 1431-1435 (1985)
- (3) M.Takano, K.Hirosaki, M.Takimoto, S.Ichimura, and K.Nakamura: 'Improvements in controllability of ultrasonic linear motors by longitudinal-bending multilayered transducer with independent electrodes', *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 50, 7, 07HE25-1-6 (2011)
- (4) C.H.Yun, T.Ishii, K.Nakamura, S.Ueha, and K.Akashi: 'A high power ultrasonic linear motor using a longitudinal and bending hybrid bolt-clamped Langevin type transducer', *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.40, Part 1, No.5B, pp.3773-3776 (2001)
- (5) <https://scholar.google.co.jp/>
- (6) 指田年生: "超音波駆動モーターの試作", 応用物理, 51, 713-719 (1982)
- (7) <https://www.nanomotion.com/>
- (8) M.Umeda, K.Nakamura, and S.Ueha: 'Effects of vibration stress and temperature on the characteristics of piezoelectric ceramics under high vibration amplitude levels measured by electrical transient responses', *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, Part 1, 9B, 5581-5585 (1999)
- (9) T.Ishii, T.Shinkoda, S.Ueha, K.Nakamura, and M.Kusosawa: 'Efficiency improvement of an ultrasonic motor driven with rectangular waveform', *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, Part 1, 5B, 3281-3285 (1996)
- (10) W.Qiu, Y.Mizuno, M.Tabaru, and K.Nakamura: 'Can lubricant enhance the torque of ultrasonic motors? An experimental investigation', *Appl. Phys. Lett.*, 105, 22, 224102 1-4 (2014)
- (11) W.Qiu, Y.Mizuno, K.Adachi, and K.Nakamura: 'Ultrasonic motor performance influenced by lubricant properties', *Sensors and Actuators A: Physical*, 282, 183-191 (2018)
- (12) J.Wu, Y.Mizuno, and K.Nakamura: 'Polymer-based ultrasonic motors utilizing high-order vibration modes', *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 23, 2, 788-799 (2018)
- (13) J.Wu, Y.Mizuno, and K.Nakamura: 'Ultrasonic motors with poly phenylene sulfide/alumina/PZT triple-layered vibrators', *Sensors and Actuators A: Physical*, 284, 158-167 (2018)
- (14) X.Zhang, K.Nakamura, and S.Ueha: 'Two-joint robot finger design based on multi-degree-of-freedom ultrasonic motors', *Acoustical Sci. & Tech.*, 30, 1, 42-47 (2009)
- (15) 中村健太郎: "高出力超音波モータ", 日本音響学会誌, 61, 3, 149-153 (2005)
- (16) 中村健太郎: "超音波モータの原理と特徴", 自動車技術, 62, 7, 16-21 (2008)
- (17) 中村健太郎: "超音波アクチュエータ", IEICE Fundamentals Review, 7, 3, 249-255 (2014)

#### 【筆者紹介】

中村 健太郎

東京工業大学 科学技術創成研究院  
未来産業技術研究所 教授

## ● 優良技術図書案内

### 実務で使う 静電気対策の理論と実践

藤田 司・他 A5判286頁 2,800円+税

お問合せは日本工業出版(株) フリーコール 0120-974-250 <https://www.nikko-pb.co.jp/>