

超音波モータと超音波浮上搬送

Ultrasonic Motors and Ultrasonic Levitation Transport

中村健太郎*

超音波振動や空中超音波音場のアクチュエータや物体非接触搬送への応用例として、超音波モータと大型平板の浮揚搬送について概説した。前半で超音波モータの主な方式とその動作原理、特性をまとめた。後半では、空気中での平板の浮揚現象と、その応用である大型ガラス基板の非接触搬送装置を紹介した。

1 超音波駆動アクチュエータの利点

アクチュエータとは「ものを動かす」デバイスの総称であり、半導体微細加工によるマイクロメートル・オーダの大きさの静電気力駆動のものから、油圧で動く大型重機のものまで様々なものがある。ロボティクス用途をはじめ、小型軽量で発生力の大きいアクチュエータが求められている。一方、新規エレクトロニクスデバイスの製造などでは材料や部品の非接触搬送の要求が高まっている。超音波振動や超音波音場で駆動されるアクチュエータは、特性や機能性がこれらを満たす可能性があり、様々な開発が行われてきている。本稿では、その代表例として、摩擦駆動の超音波モータと非接触駆動の浮上搬送技術について紹介する。

どちらも圧電現象を利用した超音波振動子を用いているが、接触駆動の超音波モータと空中音場を介して非接触駆動する搬送技術とは動作原理を全く異にする。そのため、得られる特性も応用先も異なっている。

2 超音波モータ

2.1 超音波モータの特徴

超音波モータは圧電セラミックス（主にチタン酸ジルコン酸鉛）で発生した超音波振動でロータやスライダを擦って駆動するモータである。電磁力で動作する従来のモータとは構造・動作原理が全く異なり、特性も異なっている。小型で高トルクが得られるため、ギアによる減速が不要であり、応答が速い。また、振動を止めれば、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応用などで総合的にみて消費電力を抑えることにつながる。電磁モータに比べると電磁ノイズ輻射が小さい。また、非磁性化が可能である。ギアレスのため低騒音である。電磁モータでは実現しにくい薄型やリング型が可能である。一方、高周波電源が必要であることが単純用途では、デメリットとなる。

圧電超音波振動子はエネルギー密度が高く、それをモータ出力に反映できれば小型で高出力なモータが実現できるはずであるというのが超音波モータ開発のモチベーションのひとつである¹⁾。

* Kentaro Nakamura 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授

例えば、超音波加工などに使われるパワー超音波振動子の代表例であ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500~1000 W/kgである。負荷インピーダンスを適切に選べば振動子の最大効率 $\geq 95\%$ を越えるので、高いエネルギー密度が得られる。このような高いエネルギー密度は、程度の差こそあれ、他の形式の圧電振動子でも同様である。市販の進行波型超音波モータの定格出力をDCサーボモータのそれとともに図1に示す。これより、現在の超音波モータの出力はランジュバン型振動子の1/10以下であるものの、小型なものでは、小型化により特性が急に低下するDCサーボモータより有利であることがわかる。モータ重量に対する出力トルクは図2のように超音波モータが大きいことがわかる。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

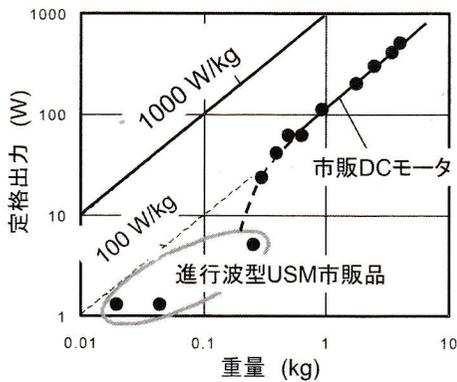


図1 モータの重量と定格出力

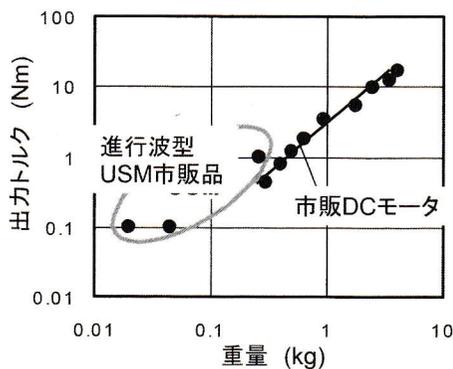


図2 モータの出力トルク

タの運動に変換する際の損失が大きく、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。

2.2 超音波モータの分類

超音波モータの実用的な研究は1980年前後に日本を中心に始められ、それ以来、様々な方式が開発されてきたが、図3のように、その動作原理から進行波型と定在波型に大別される²⁻⁵⁾。進行波型では、振動体に進行波振動が伝搬するときの表面の楕円振動軌跡を利用している。リニア型では金属棒の両端に振動子を接続し、それらの振動子の片方を駆動用、もう片方を吸収用として進行波を励振している。回転型では、2つの同じモードの定在波で発生位置が1/4波長だけずれたものを90°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な進行波を発生している。進行波によるリニア型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を代表例として実用化されている。棒状の進行波方式の回転型は直径10 mm程度のものがカメラ用途で実用化されているが、直径数mmのマイクロモータの試作例も複数報告されている⁶⁾。円板や円環状の振動子を用いる進行波による回転型は直径30~60 mmのものがモータ単体でも市販されている。このようなモータでは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2つの異なった振動モードを組み合わせる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。矩形の圧電セラミック板の1次縦振動と2次たわみ振動を組み合わせたL1B2といわれるものが多く開発されており、そのいくつかは光学機器などにおいて実用化例がある⁷⁾。ランジュバン型振動子により大出力化したものは半導体製造装置用で試作例があり、一部は少量生産された実績もある。この大型のものでは、直径40 mmの振動子で最大推力10 kgf、無負荷速度0.5 m/sという試作例が報告

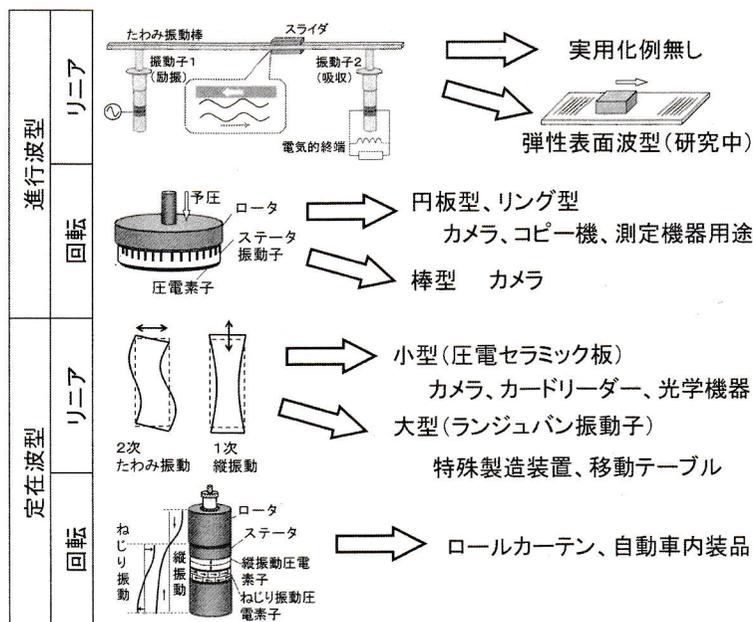


図3 超音波モータの分類と応用

されている⁸⁾。定在波の組み合わせはいろいろ考えられるため、この構成法はバリエーションに富んでおり、これまでにさまざまな方式が提案されている。回転型は縦振動とねじり振動を組み合わせたものが最も多く検討されている。直径5mmの小型のものから直径120mmのものまで試作例があり、直径120mmのものでは最大トルク400 kg・cmを記録している。直径25mm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形では、自動車内装品として短期間ではあるが実際に搭載された例もある。

定在波振動による回転型の変形として、多自由度超音波モータがある。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3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3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、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⁹⁾。

2.3 進行波型超音波モータの構造と動作

最も実用化が進んでいる円板や円環のたわみ振動モードを回転させる方式について解説する。この超音波モータでは、図4のように、アルミニウム合金など金属製振動体の底面に円環状の圧電セラミックス板を接着したものがステータとなる。上面がロータ底面に押し付けられている。圧電素子の底面の電極は分割されており、位相差90°の電圧を印加する。これにより、目的とする振動モードで、位置が1/4波長ずれた2つの振動を互いの時間的位相差90°で励振している。この2つの振動の円周方向分布は、角度を θ 、時間を t 、振動次数を n として、それぞれ

$$u_1(\theta, t) = A \cos n\theta \cos \omega t \quad (1)$$

$$u_2(\theta, t) = A \sin n\theta \sin \omega t \quad (2)$$

と書くことができる。Aは振動振幅である。これらはそれぞれ定在波であるが、同時に励振すると、その和である進行波振動が以下の式のように発生する。

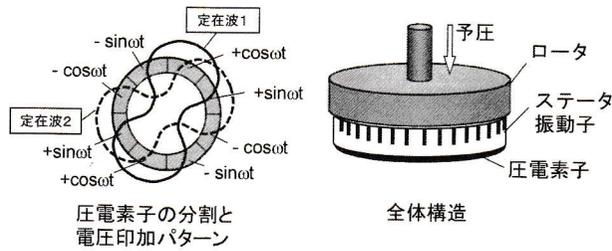


図4 進行波型超音波モータの構造と電圧印加

$$u_1(\theta, t) + u_2(\theta, t) = A \cos(n\theta - \omega t) \quad (3)$$

たわみ振動などの進行波振動が起きると、その表面の各点は図5のように楕円軌跡を描く。押し付けられたロータはこの楕円軌跡により摩擦駆動される。ここで、(1)式か(2)式のどちらかの符号を変えると(3)式の進行波の進行方向が逆転するので、ロータの回転方向を反転できる。なお、進行波の進行方向と楕円振動の回転方向の関係は利用する振動の種類によって異なる。

2.4 複合振動子型超音波モータの構造と動作

複合振動型は典型的な定在波型の構成であり、図6のように棒のねじり振動と縦振動を組み合わせ、棒の端部に押し付けたロータを回転させる¹⁰⁾。ねじり振動を発生する周方向分極圧電素子と縦振動を発生する厚み方向分極圧電素子を金属ブロックではさみ、ボルト締めした振動子を用いている。縦振動とねじり振動の位相差が90°になるように2つ圧電素子を2相電源で駆動すると、接触面に楕円振動軌跡が得られる。ロータ接触面に垂直な縦振動により超音波周波数で動的に予圧を変動させ、これに同期した接触面に平行なねじり振動の正の半周期を選択的に取り出してロータを一方向に駆動していると理解することができる。この動作を超音波振動の1周期を4分割して図解したのが図7である。

ボルト締め振動子は強靱で大出力であり、予圧を大きくできることもあって、大きな出力トルクを期待できる。直径5~120 mm までの試作例があるが、直径25 mm のもので最大トルク 10 kgf・

cm 程度が得られている。予圧を大きくできることを利用して、大予圧下でロータ駆動面に潤滑油を導入すると大出力化と高効率化が実現できるという報告がある¹¹⁾。

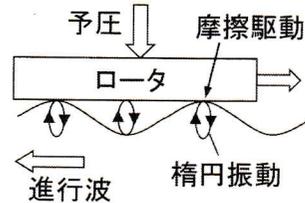


図5 進行波振動の進行波による楕円軌跡とロータの駆動

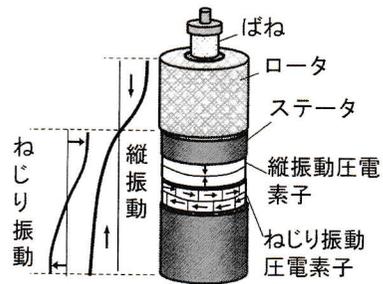


図6 複合振動子型超音波モータの構造

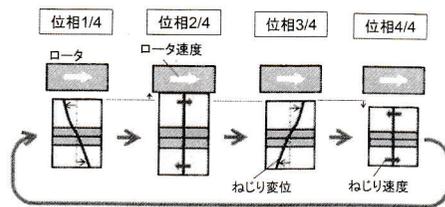


図7 複合振動子型超音波モータの動作

3 平板の非接触浮揚搬送

3.1 近距離場音場浮揚

空中の音場波長程度以上の大きさの平面振動面に同じ形状の物体を置くと、振動面の直上に物体が浮く現象がある^{12,13)}。図8のように、ピストン振動する面の上に同じ大きさの平板を浮上させた場合、振動面の振動振幅を u 、浮上量を h と平面にかかる荷重 w との間には近似的に次の関係がある。

$$w = \frac{1+\gamma}{4} \rho c^2 \frac{u^2}{h^2} \quad (4)$$

ρ 、 c 、 γ はそれぞれ空気密度、音速、比熱比である。超音波振動の周波数が 20~40 kHz のとき、振動振幅は高々数十 μm 程度であり、接触することなく浮いた状態になる。図9に(4)式と実測結果をまとめている。浮上する平板は音波が透過しないものなら材質を選ばない。重量を大きくすると浮上量は小さくなる。板を重力に抗して浮上

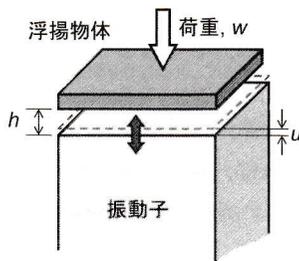


図8 平板の超音波浮揚

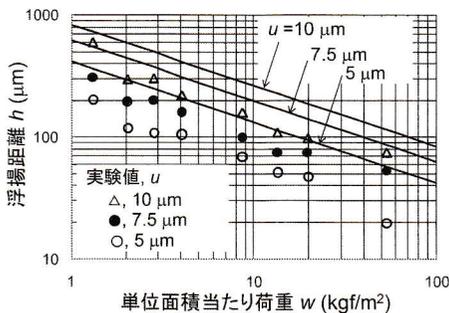


図9 浮揚力と浮揚距離の関係

する力は音響放射力のひとつと考えることができる。板が音の伝搬をさえぎることにより、板の表と裏で音響エネルギー密度に差が生じることが浮上力の根源と考えられる。振動面が板に触れるとき、すなわち浮上量 h が振動振幅 u と等しくなる荷重が最大荷重であり、計算上は、ハガキ大の振動面に対して 100 kgf 程度となる。実際には、振動面や浮揚する板がたわんでいたりするので、これよりも小さい値で接触状態となる。

3.2 大型平板の浮揚搬送

平板のたわみ振動進行波を利用することで物体を浮上したまま非接触搬送することができる^{14~17)}。図10に示すように、板に縞モードのたわみ振動を励振する目的でランジュバン振動子と振動板の間に幅広の板状ホーンを挿入している。縞モードとは、波面が板の長手方向と直交し、板の幅方向には振動が一樣な振動モードである。ここでは、吸収端に振動子と電気負荷を用いている。振動子と電気抵抗負荷 R との電氣的整合のため、圧電素子の静電容量を打ち消すためのインダクタ L を挿入している。 R の値を調整して定在波が生じないようにする。電気抵抗でエネルギーを消散するかわりに、これを駆動側に還流すれば消費電力を節約できると考えられる。

図11のように、振動板と浮揚した搬送物との狭い空気ギャップ中には進行波音場による音響流が生じ、この流れにより空気の粘性を介して浮

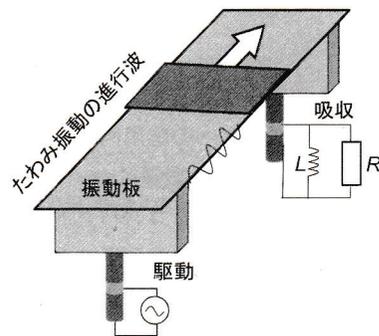


図10 平板の非接触搬送のための振動系

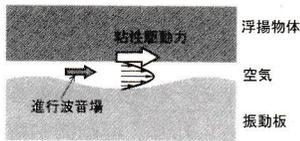


図 11 振動板と浮揚物体間の空気流

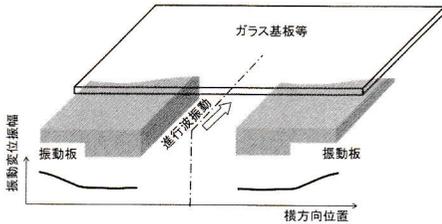


図 12 大きな板を搬送するための振動系の例

揚された物体に搬送方向の力が与えられる。これにより、浮上したまま非接触で搬送される。このとき、搬送方向と直交する方向に、音響流による保持力を発生させることができる。浮揚物体の位置が横方向にずれた場合、それを中央にもどす方向に音響流が発生するような構成が可能である。さらに大面積の物体の場合には、振動板を複数枚並列に並べる方法がある。図 12 では 2 枚の振動板を、間を空けて平行に並べている。また、振動板の端部の厚みを減じることで、その部分の振動変位が厚い部分に比べて大きくなるようにしている。こうすることで、振動板と浮揚物体の間に、振動板の薄い部分から厚い部分へ向かう音響流が生じ、浮揚物体を中央に保つ効果が大きくなる。

4 まとめ

超音波振動や空中超音波音場のアクチュエータや物体非接触搬送などへの応用例として、超音波モータと大型平板の浮揚搬送について概説した。超音波モータには非磁性、コンパクト、低速高トルクなどの特徴があり、製造分野での応用が広がることも期待したい。自由に使える市販品が少ないので、モータそのものの開発から始める必要があったり、駆動回路や制御系にかかわる技術が電

磁モータほどは成熟していないのが難点である。この記事では漏れてしまったが、リニア型も多数開発されており、超音波モータを組み込んだ光学ステージも市販されている。一方、平板の浮揚搬送技術は大型ガラス基板の処理工程用に実用化された例もあるが、ディスプレイ製造の現場でどの程度利用されているかわからない。著者の推測の範囲であるが、今後進展が進む折り曲げ可能なスマートフォンなどで一定の活用が行われるのではないだろうか。一方で、微小物体や液滴の非接触搬送の需要が今後急速に高まると思われる。そのために超音波浮揚を用いる試みも進んでいる¹⁸⁾。

文 献

- 1) 指田年生, 応用物理, **51**, 713-719 (1982)
- 2) S. Ueha *et al.*, 'Ultrasonic Motors, -Theory and Applications,' Oxford Press, New York (1993)
- 3) 中村健太郎, 日本音響学会誌, **61**, 149-153 (2005)
- 4) 中村健太郎, 自動車技術, **62**, 16-21 (2008)
- 5) 中村健太郎, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ, *Fundamentals Review*, **7**, 249-255 (2013)
- 6) T. Morita, M. Kurosawa, T. Higuchi, *Sensors and Actuators*, **A50**, 75-80 (1995)
- 7) M. Takano *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 07HE25-1-6 (2011)
- 8) C. Yun *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 3773-3776 (2001)
- 9) X. Zhang *et al.*, *Acoust. Sci. & Tech.*, **29**, 235-237 (2008)
- 10) M. Kurosawa, S. Ueha, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **38**, 89-92 (1991)
- 11) W. Qiu *et al.*, *IEEE Trans. Ultrason.*,

- Ferroelec., Freq. Contr.*, **60**, 786-794 (2013)
- 12) Y. Hashimoto, Y. Koike, S. Ueha, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **16**, 189-192 (1995)
- 13) 野村英之, 鎌倉友男, 音響学会誌, **56**, 805-814 (2000)
- 14) Y. Hashimoto, Y. Koike, S. Ueha, *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**, 2057-2061 (1996)
- 15) Y. Hashimoto, Y. Koike, S. Ueha, *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 3230-3233 (1998)
- 16) 小池義和, 上羽貞行, 日本機械学会誌, **111**, 420-423 (2008)
- 17) 中村健太郎, 日本音響学会誌, **69**, 603-608 (2013)
- 18) 中村健太郎, 電気評論, **101**, 22-26 (2016)

環境と福祉を支えるスマートセンシング

監修：環境・福祉分野におけるスマートセンシング調査研究委員会

- ★健康的で安全な生活環境を守り、進む超高齢化社会の中でもQOLを向上させていくため、今後ますます重要性が高まるスマートセンサの現状と課題をケミカル、フィジカルごとに解説!
- ★環境分野では、人体に影響を及ぼすガスや空気中化学物質の検出技術、「見える化」・「制御」の高機能化など実例を交えて紹介!
- ★福祉分野では、人体内外の液体やガス、生体信号のセンシング、インプラントデバイスやウェアラブルデバイスをソフト・ハード面から解説!

第1章 スマートセンシング

第2章 環境に関わるケミカルセンシング

- 2.1 はじめに
- 2.2 ガスセンサ
- 2.3 室内・生産施設環境とケミカルセンサ
- 2.4 PM2.5
- 2.5 医療・排ガス・匂い
- 2.6 労働衛生分野における適用事例・具体例
- 2.7 まとめ

コラム 粒子状物質汚染 (勝部昭明)

第3章 環境に関わるフィジカルセンシング

- 3.1 はじめに
- 3.2 屋内環境におけるスマートセンシング
- 3.3 スマートセンシングのためのエネルギーハーベスティング
- 3.4 ビッグデータを用いたスマートセンシング
- 3.5 センシアブルシティ
- 3.6 農業のスマートセンシング
- 3.7 スマートセンサを用いた放射線量モニタリング
- 3.8 参加型の放射線モニタリング事例

3.9 まとめ

コラム スマートセンシングとプライバシー

第4章 人体に関わるケミカルセンシング

- 4.1 はじめに
- 4.2 侵襲型・低侵襲型デバイス
- 4.3 人体から放出されるガス・においのセンシング
- 4.4 汗のケミカルセンシング
- 4.5 味覚のセンシング
- 4.6 食品劣化のセンシング
- 4.7 まとめ

コラム 究極のスマートセンサ

第5章 からだに関わるフィジカルセンシング

- 5.1 はじめに
 - 5.2 生体信号を使ったウェアラブルデバイス
 - 5.3 ウォーキングによる高齢者健康維持と健康寿命延伸
 - 5.4 計測・蓄積データの利活用～ライフログとゲーミフィケーション～
 - 5.5 まとめ
- コラム 観光とセンサ

■体裁/A5判・206頁 ■発行/2016年6月 ■本体/62,000円+税

申込 FAX : 03(3293)2069 <http://www.cmcbooks.co.jp/>

シーエムシー出版