

プリンタ内部で微小なインクの粒を 1 秒間に 1000 万個も正確に吐出する「高速アクチュエータ」

力の単位は、日常では「kgf」（キログラム重（キログラムフォース））が使われるが、科学技術の分野では「N」（ニュートン）が使われる。N で表示された数値を kgf に換算する際は 9.8 という係数で割るだけなので、どちらの単位を用いても本質的な違いはない。ただし、N を用いると他の物理量を表す際に面倒な係数が出てこないように、種々の単位がうまく体系的に定義されており、科学技術の分野では N を使うことが国際的な決まりになっている。

ブラシレス DC モータ

ブラシレス DC モータは、近年よく使われるようになってきたモータだ。この名前に矛盾を感じないだろうか？

通常は、ブラシをもつモータが DC モータで、もたないものが AC モータである。つまり、ブラシレス DC モータは、見方によって AC モータとも DC モータとも解釈できる、“コウモリ的存在”のモータなのである。

その構造は、同期モータとほぼ同じである。構造的には同期モータであるにもかかわらず、一般の同期モータと区別して、わざわざ「ブラシレス DC モータ」とその正体をカモフラージュするような名前と呼ぶのはなぜなのか？

その答えは、このモータが動くしくみと特性を知れば理解できる。このモータには、ロータの回転角を検出するセンサが搭載されており、ロータの回転に応じて各コイルの通電方向を電子回路で切り替える。つまり、**通常の DC モータのブラシの役目を、センサと電子回路が代行しているのだ。**DC モータとよく似た特性を示すのはこのためだ。

通常の同期モータでは、ロータの動きが磁界の切り替えに追従してきているかどうかはお構いなしに、電流の流れを切り替える。このため、大きな負荷がモータの回転軸にかかると、「脱調」という現象を起こして正常に回転しなくなる。

これに対し、ブラシレス DC モータはロータが所定の位置に来たことをセンサで確認してから初めて、電流を切り替えている。このため、回転軸に負荷をかけていくとロータの動きが遅くなり、モータの回転速度がしだいに落ちていくという、DC モータとまったく同じ特性を示すのだ。

ブラシの代わりにするセンサと電子回路を“ブラックボックス”と見てしまえば、使い方も特性も DC モータと同じになる。「体は同期モータだが、性格は DC モータ」であることが、ブラシレス DC モータという一見矛盾した名前の由来となっているのだろう。

AC モータの大立役者「インバータ」

AC モータの最もシンプルな使い方は、50Hz や 60Hz といった工場や家庭に供給される交流電源にそのままつないで駆動する方法である。この場合は電源の周波数が一定であるため、回転速度を自由に変えることはできないが、それでも実際には世界中の多くの AC モータがこの方法で

「動力源」として広く使われている。

回転速度を自由に変えるには、コイルに通電する交流電流の周波数をモータの回転数に応じて変える必要があり、「インバータ」と呼ばれる制御装置が用いられる。インバータを使って駆動される速度制御可能な AC モータは、「インバータモータ」と呼ばれる。

インバータはパワーエレクトロニクス技術の発展が誇る成果で、1980年頃から使われ始めた。それ以前の AC モータを、「単に一定速度で動作する電動機」から、さまざまな運転条件下で自由にコントロールできる「賢いモータ」という地位に持ち上げた大立役者である。

実は、このインバータが実用化されるまでは、たとえば同期モータは「賢いモータ」どころか、「始動させるのに一苦労させられるモータ」にすぎなかったのだ。すなわち、モータが停止している状態に、いきなり 50Hz や 60Hz といった交流電流を投入しても、ロータの動きがこれに追従できないために動き出さないのだ。インバータを使うことで、ゆっくりした周波数から徐々にロータの回転数を上げていくことができるようになり、容易に始動できるようになった。

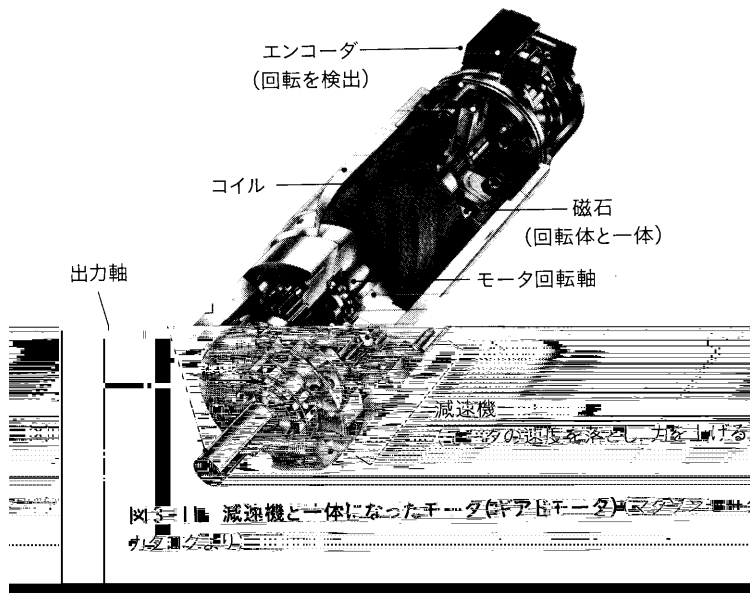
電磁モータの性能を引き出す減速機

電磁モータを使う際のもう 1 つの重要な要素として、「減速機」がある。たとえば、ロボットの関節を作る際には、通常の電磁モータの性能では回転数が高すぎる一方、トルクが小さすぎるという問題がある。

そこで、通常のロボットでは、電磁モータの出力軸でダイレクトに関節を駆動することはほとんどない。歯車機構によってモータの回転数を落とす減速機を用いることで、関節を駆動するケースが多いのだ。自転車のギアチェンジを思い浮かべてもらえばわかるように、速度を落とすのに伴ってトルクが増大するので、きわめて都合がいいからである。

一方、ロボットやメカトロニクス機器で用いる比較的小型の電磁モータでは、一般に $1/10 \sim 1/300$ 程度の大きな減速比の減速機を使う場合が多い。モータの回転をそのままダイレクトに使うケースはむしろ少ないので、はじめから減速機と一体化してモータメーカーから販売されている場合も多い。その場合は、**ギアドモータ**という名前で呼ばれている (図 3-11)。

電磁モータにある程度の「力作業」をさせる場合には、減速機が必須であり、モータの能力を生かせるか否かを決める重要な構成部品となる。小型のギアドモータでは、モータ本体よりも**減速機のほうが長いものもあるくらいだ**。スパー減速機、遊星歯車減速機、ハーモニックドライブ減速機、サイクロイド減速機、ウォーム減速機……といったさまざまな減速機が開発されている。、詳細はここでは触れないが、「機構学」といった名前のつく専門書に詳しいので参照していただきたい。



マイクロモータ

携帯電話のマナーモード時に着信を知らせる振動アクチュエータにはいくつかの種類があるが、最も広く使われているのは、回転軸にアンバランスな重りをつけた（モータの回転軸に対して片側だけに重りが取り付けられている）マイクロモータである（図3-14）。モータを回転させると、このアンバランスな重りが振れ回るので、携帯電話本体がブルブル振動するしくみになっている。外径が3mm程度の小型のブラシ付きDCモータが使われることが多い。

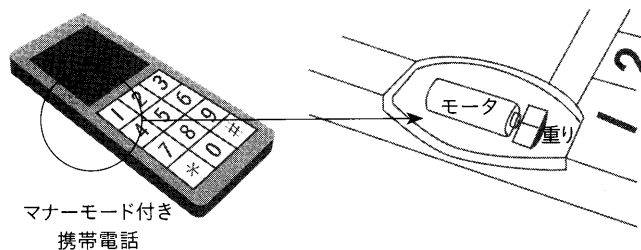


図3-14 携帯電話のマナーモードでの着信を知らせるマイクロモータの例

圧電アクチュエータとは何か

力と速度と精密さと——三拍子揃った優れもの

「圧電体」と呼ばれる固体材料（主にセラミック）は、電圧を加えるとわずかに変形する性質をもつ。この現象を利用したのが圧電アクチュエータである。ピエゾアクチュエータ（piezo electric actuator）とも呼ばれる。

圧電アクチュエータは力が強く、応答性も高いが、変形量は非常に小さい。当たり前だが、セラミックが壊れずに変形する範囲でしか動かないのだから、もともと大きな変形量がとれるはずもない。

動きの量が非常に小さいため、これを拡大する工夫が圧電アクチュエータ設計のポイントの1つになる。

身近なところでも、この圧電体の「圧電効果」と「逆圧

電効果」が利用されている。ライターや簡易ガスコンロの着火装置では、**圧電体を擦ることで発生する電荷の火花**を利用している。これは「圧電効果」である。

一方、開くと電子音の音楽が流れ出すお祝いカードがあるが、このカードに埋め込まれているのは**圧電スピーカ**である。**圧電体に電気信号をかけることで空気を振動**させて音楽を流す。こちらは「逆圧電効果」を利用したものだ。

つまり、ナノメートルレベルで、プローブと試料を精密に動かす必要があるのだ。これを行っているのが**圧電アクチュエータ**である（図5-2）。

さらにすごいのは、原子1つ1つを自由に動かし、並び変えられることを示したことだ。**35個のキセノン原子を並び替えて“IBM”という文字を書いた写真は、世界を驚かせた**。ニッケルの単結晶表面にあるキセノン原子にプローブ先端を近づけ、プローブとキセノン原子間に働く微小な力を利用してキセノン原子を「捕捉」し、基板に沿って横方向に移動させる。これを繰り返すことによって**35個の原子を好きな位置に並べた**のである。

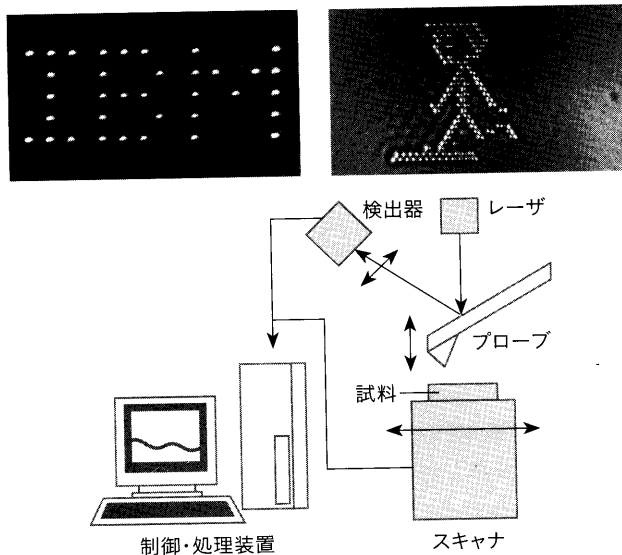


図5-2 原子を見ることを可能にした超精密位置決めアクチュエータ：
プローブ顕微鏡の原理(下)、35個のキセノン原子で書かれた「IBM」
(左上。AP/アフロ)、複数の原子を並び替えながら撮影した「少年の動き」
(右上。IBM/AP/アフロ)

ディーゼルエンジンでは、燃料をシリンダに噴射する際に、高圧の燃料を3~5回に分けて噴射することで、排気ガス成分中のPM粒子（Particulate Matter。粒子状物質）やNOx（窒素酸化物）を低減させることができる。「多段噴射」と呼ばれるもので、まず「パイロット噴射」、次に「メイン噴射」、最後に「アフター噴射」といった具合に、噴射量と噴射タイミングを調整しながら噴射するのである。このような**多段噴射を1ms程度のあいだに正確に行う**ためにバルブを開閉し、1600気圧の高圧燃料の流れを操っているのも、**圧電アクチュエータ**である（図5-3）

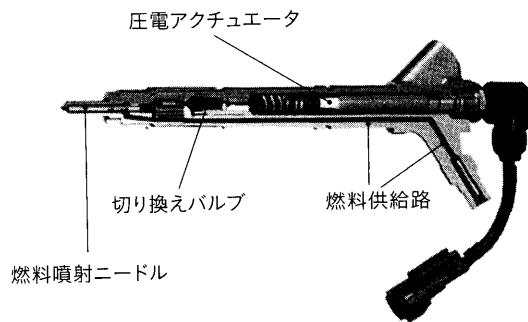


図 5-3 ディーゼルエンジンの革命, 高速動作の圧電アクチュエータによる燃料噴射(株式会社デンソー提供)

インクジェットプリンタは、微量な粒状のインクを紙に飛ばしていく方式のプリンタである。印刷の高品質化高速化に伴い、インク吐出の微小化と高速化が求められる。たとえば、印刷の解像度 1200dpi、印字速度 50cm/s を実現するには、**2万 5000回/秒の速度で 1~2pl (ピコリットル=1~2×10⁻¹²リットル) のインクの液滴を吐出する必要がある。**

インクジェットプリンタには、ヒータを使ってインクに気泡を発生させて噴射するサーマル方式と、圧電アクチュエータを使ったピュゾ方式がある。ピュゾ方式は、1990年代にセイコーエプソンが開発し、「マッハジェットプリンタ」という名前で売り出したことで有名だ。ピュゾ方式では、圧電アクチュエータでインクが入った微細管を変形させることで、インクを管外へ吐出する(図 5-4)。2万 5000回/秒の高速の動作を行っている。

したがって、たとえば4色カラープリンタで360個のノズルが集積された印字ヘッドでは、1秒間当たり1000万個以上のインクの微小な粒を作り出すことになる。

SAW フィルタは、現代の情報化社会になくはならない電子デバイスだ。意外に思うかもしれないが、携帯電話の信号処理でも圧電アクチュエータが活躍している。

SAWは「Surface Acoustic Wave」の略で「ソー」と呼ばれる。日本語に訳せば「表面弾性波フィルタ」だ(図 5-6)。

SAW フィルタは圧電体基板の表面に「くし形」状の電極が形成されただけの簡単な構造をしている。さまざまな周波数が混在した電気信号の中から、特定の周波数の信号を取り出すデバイスである。携帯電話では、ノイズの原因となる余計な周波数の信号をカットし、目的とする周波数帯域の信号だけを取り出す役割を果たしている。

入力側のくし形電極に信号が入ると、圧電効果により圧電体基板の表面が振動する。ただし、このとき大きく振動するのは、くし形電極のピッチ(λ)に一致する波長をもつ周波数の波だけだ。

図を見ていただければイメージがわくと思うが、振動の山と谷がくし形電極に一致すると振動が強く発生する。こうして励起された変形波は圧電体基板の表面を伝わり受信側のくし形電極で電気信号に変えられる。

ここでも効率的に「振動一電気」に変換されるのは、電極ピッチ(λ)と一致する波長をもつ信号だ。このように

して、さまざまな周波数が混在する信号の中から特定の周波数帯の信号のみ取り出すことができる。

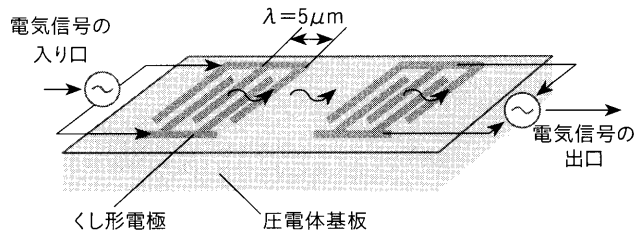


図5-6 SAWフィルタ、振動で伝えてノイズを除去(波長がλの振動のみが伝わる)

外径 1.8 mmの細径超音波モータ

極低温

きょくていおん 理学系の読み方
ごくくていおん 工学系の読み方

このモータは、2つの傘歯車（回転傘歯車と**章動**傘歯車）とゴム製のダイヤフラムから構成される。回転傘歯車はモータの出力回転軸と一体になっており、章動傘歯車は、任意の方向に自由に傾くように自在継ぎ手で支えられ、回転傘歯車にかみ合いながら振れ回り運動をする。

「**章動**」という言葉は聞きなれないかもしれないが、物理学の世界でも・コマの歳差運動（コマが自転しながらその自転軸が振れ回る運動）を意味する用語として使われる。

マッキベン人工筋は、きわめて簡単な構造で大きな力が出せる。また軟らかい素材でできているため、人間と接する機器などに応用されている。

この人工筋は1950年代の終わりに米国で開発され、人間の腕の動作を支援するリハビリ機器に採用された。

開発当時はゴムの耐久性に問題があったが、1980年代中頃の第一次ロボットブーム時に、ブリヂストンがゴムの耐久性を改善し、この人工筋やこれを用いたロボットを販売した。引火の危険性から電気駆動を避けたい塗装ロボットや、人間と接する安全性の高いロボットとして用いられた。この頃から、**ラバチュエータ**という名前でも呼ばれるようになった。ラバーとアクチュエータをあわせた造語である。

岡山大学の則次俊郎名誉教授らは、マッキベン人工筋を用いて、身障者用のさまざまな動作支援システムを開発している（図7-10）。

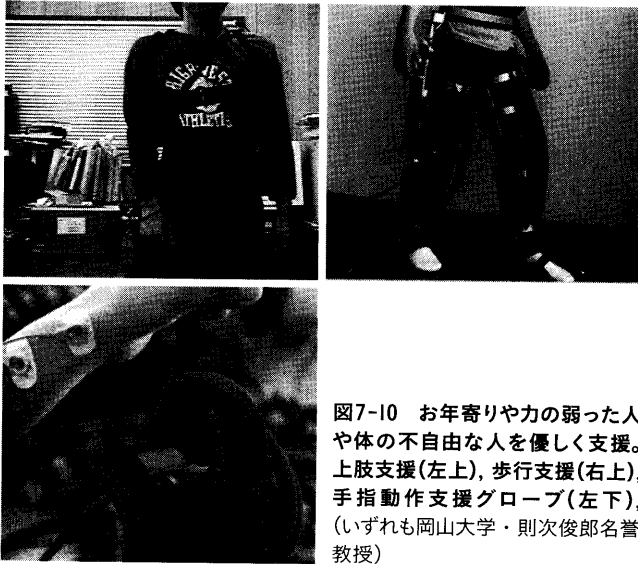


図7-10 お年寄りや力の弱った人や体の不自由な人を優しく支援。上肢支援(左上), 歩行支援(右上), 手指動作支援グローブ(左下), (いずれも岡山大学・則次俊郎名誉教授)