

ミミズは波動を伝播しようによ進む 柔軟生物と超音波モータ

慶應義塾大学理工学部機械工学科 前野隆司

1. はじめに

ロボットがブームである。ホンダの2足歩行ロボットやソニーのペットロボットが脚光を浴び、9月に行われた第16回日本ロボット学会学術講演会では過去最高の650件もの研究発表が行われた。ロボットなどの動く機械は、生産現場や極限作業の場から、医療・福祉・家庭・アミューズメントなどの人との親和性が要求される場に広がり続けている。私も、人と親和するロボットはどうあるべきか、また、機械と生物はどのような機構によってどのような動きを生成すべきなのか、あるいはしているのか、という点に魅せられて、アクチュエータやロボットの研究開発を行ってきた。

『生物』の移動様式にはどのようなものがあるだろうか？最初に思い浮かぶのは歩行である。たとえば人間の2足歩行は複雑で、これを理解したり、ロボットとして再現することは楽しい。一方、哺乳類よりもややシンプルな動物達、ヘビやイモムシ、ミミズなどは、足を用いないで移動する。たとえば、ミミズやカタツムリは、地面との接触部に伸縮波を発生させ、これをからだの前方から後方へと伝播することにより移動運動を生成する。彼らは、哺乳類の足のような明確な歩行のための器官を持たず、筋肉であり構造体であり移動部でもある部分部分をうにようによ動かす結果、全体としてはある統合された運動を生成し、

穴の中や物体の上を移動している。

では、『機械』の移動運動にはどのようなものがあるだろうか？地上で最も効率がいいのは、回転運動を利用した移動である。自動車は、エンジンの運動が回転運動に変換され、車輪が転がることにより移動する。OA機器やプラモデルのアクチュエータには一般に回転型電磁モータが使われている。しかし、ミミズのように部分部分をうにようによ動かす結果、全体としてはある統合された運動を生成し、移動するモータというものも考えられないだろうか？こうして考え出された（！？）のが超音波モータである。超音波モータは、ミミズのように後退波を伝播することにより移動運動を生成するアクチュエータである。

以上のように、歩行や転がり運動よりもマイナーだが、波動を伝播しながら移動するミミズや超音波モータのような移動機構が存在する。これらは、対象物に、ゆっくりと、しかししっかりと接触しているため、環境の変化に対してロバスト（頑強）である。そこで、本稿では、ミミズの運動と超音波モータの駆動原理を対比しながら、波動伝播に基づく移動機構について述べる。

2. 柔軟生物の移動様式

足を持たずに固体表面を移動できる動物には、ヘビ、イモムシ、ミミズ、あるいはアメーバなどがある。いずれもうにようによ動いているよう

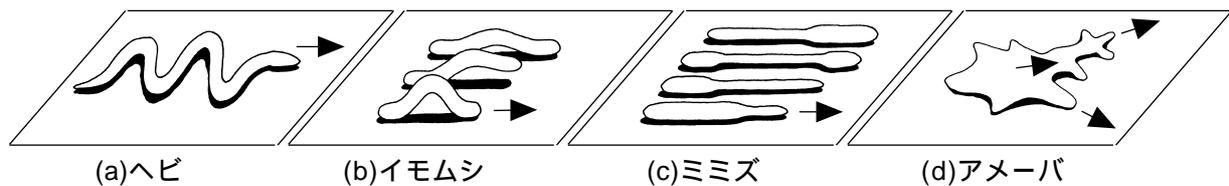


図1 柔軟生物の移動様式の模式図

だが、運動のパターンは異なる。図1はそれぞれの動物の運動パターンの模式図である。

脊椎動物であるヘビは、図1(a)のように、水平面内で体をくねらせて移動する。くねらせ方をよく見ると、体の何方所かが曲がり、曲げ変形を後方に伝播しながら移動している。その推進メカニズムは広瀬らにより詳細に解析されている⁽¹⁾。ウナギ（脊椎動物）、ゴカイ（環形動物）、ヒル（環形動物）の水中での運動パターンも図1(a)に類似している。このような、屈曲波動を後方に伝播する移動様式は、平面内で広がることを許された環境下での移動の場合に有効である。なお、ヘビは内骨格を持つため、体をくねらすことはできるが、伸縮することは難しい。

図1(b)は、イモムシ（鱗翅類の幼虫）やシャクトリムシ（鱗翅類の幼虫）の運動の様子である。イモムシやシャクトリムシは、よく見ると小さな足を持ち、ヘビとは異なり木の葉などの対象物に対し垂直方向に伸縮運動する。ただし、最も曲がるのは体の中央部分のみであり、時間の経過とともに屈曲波動を後方に伝播するのではなく、全体の位相は一致している。すなわち、くの字になっているときは地面側の筋肉が同期して収縮しており、伸びているときには全体が伸びている。なお、ヒル（環形動物）は水中では前述のようにヘビ型の運動を行うが、地上ではイモムシ、シャクトリムシ型の運動を行う。ヒルは、周知のように、足で地面をつかむのではなく、吸盤で吸い付きながら移動する。このように、イモムシ、シャクトリムシあるいはヒルの移動様式は、足または吸盤によって対象物に自分の体の一部を固定することができ、かつ鉛直方向に障害物がない場合に有効な移動方法であるということができる。

図1(c)はミミズの蠕動運動である。ミミズは、各部分を曲げながら進むのではなく、太さと長さを変化させながら移動する。すなわち、いわゆる蠕動運動により、伸縮波を体の前方から後方へと伝播することにより移動している。ミミズの運動については後で詳しく述べる。

さらに柔軟な生物に、図1(d)のアメーバがある。彼らは、固定化された体壁を持たず原形質流動により形を変えることや、自重が相対的に小さいために重力の影響が小さいことにより、かなり自由奔放な移動運動を行いうる。驚異的なのは、細胞性粘菌のように、餌のあるときには各個体に分かれているのに、移動するときには多くの個体が融合して群体となり、あたかも1つの生物のようにふるまうものである。このようなアメーバも興味深いが、ここでは、内骨格を持たないものの、器官として形成された体壁を持つ柔軟生物について考えてみることにする。

いずれの柔軟生物の運動も、特徴的なのは、筋肉であり構造体であり移動部である部分部分を用いようよと動かす結果、全体としてはある統合された運動が生成され、移動することができるという点である。彼らの筋肉は構造的には哺乳類の横紋筋（骨格筋、心筋）と似ているが、運動は平滑筋（呼吸器、消化器などの不随意運動をつかさどる筋）と似て、律動的な運動を行う。律動的な性質は、筋そのものの特性による場合（筋源性リズム）と、神経活動によって作られる場合（神経源性リズム）がある。運動の神経支配に関しては多くの研究が行われている⁽²⁾が、本稿では運動の機械的なパターンに注目することにしよう。運動パターンに注目すると、位相の同期した波動を生成する(b)は心臓の運動に、伸縮波を伝播する(c)は

大腸の運動に、非常によく似ている。また、後で述べる超音波モータとの対応を見てみると、波動を伝播する(a)と(c)は進行波型超音波モータに、位相の同期した波動を生成する(b)は定在波型超音波モータに対応している。

では、運動のパターンと柔軟生物の構造はどのように関係しているのだろうか。ミミズを例に、もう少し詳しく見てみよう。

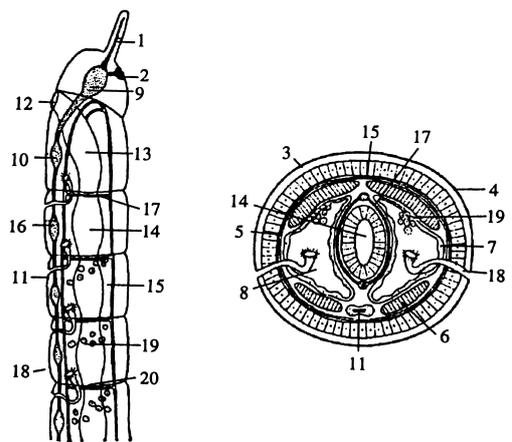
3. ミミズの移動様式

筆者がミミズに着目した理由は、ヘビのように水平面の広い面積を必要とせず、イモムシのように対象物をつかんだりヒルのように吸い付いたりすることもなく、細い穴の中や地面を移動できるからである。これは、ミミズの運動が、太さと長さを変える蠕動運動であることに起因する。では、蠕動運動はどのような運動であり、どのような機構により生成されているのだろうか。

図2はミミズの側面図と断面図⁽³⁾である。ミミズは環形動物の一種である。環形動物は、多くの体節が直列に連なった長細い動物群であり、第1体節に前口葉が、続いて多くの胴節が、最後部に尾節がある。前口葉には眼点や触手などが、胴節にはいぼ足や剛毛、エラなどがある。各体節には体腔があり、体腔内に消化系、循環系、排出系、神経系を備える。体腔の周囲は外側からクチクラ、表皮、筋肉、体腔上皮の層がある。神経系はもちろん、循環系、排出系も体節構造を有している。筋肉は、外側に縦走筋、内側に環状筋の2層がある。縦走筋は長手方向の収縮を、環状筋は円周方向の収縮をつかさどっている。つまり、ミミズは、縦走筋と環状筋に適切な収縮リズムを発生させることによって移動しているのである。

筆者らは、ミミズが平板上を直進するときのミミズの運動状態を測定した⁽⁴⁾。測定には収縮時の全長約70mm、太さ約2.4mmのシマミミズを用いた。ミミズの体表面に、長手方向にほぼ等間隔に計測用の白色標点(直径約1mm)5点を塗布し、走行路上を直進するミミズ全体を側面からビデオで撮影した。

ミミズがアクリル板上を直進する場合の各標点



(a) 側面図 (b) 断面図

1: 触手, 2: 眼, 3: クチクラ, 4: 表皮, 5: 縦走筋, 6: 環状筋, 7: 体腔上皮, 8: 体腔, 9: 脳, 10: 第1腹神経節, 11: 腹神経策, 12: 口, 13: 咽頭, 14: 腸, 15: 背血管, 16: 腹血管, 17: 側血管, 18: 腎臓, 19: 卵, 20: 隔膜

図2 ミミズの側面図と断面図

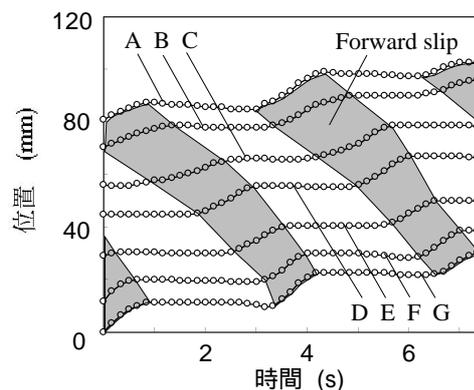


図3 ミミズの移動パターン

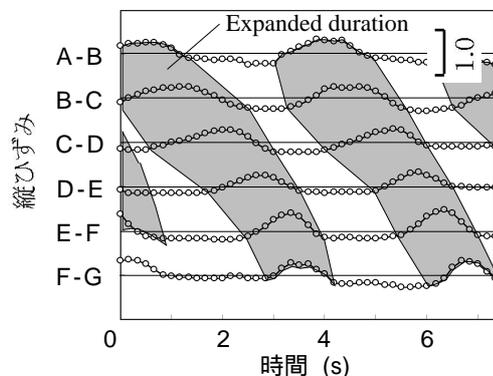


図4 ミミズの縦ひずみの変化

の進行方向位置の変化を図3に示す。A～Gは前端（頭部）から後端（尾部）までの標点を表す。前端(A)は時刻3秒から4.3秒の間に前方（縦軸上向き）に移動しており、その前後の時刻にはほぼ静止していることがわかる。また、次の標点(B)は標点(A)にわずかに遅れて前向きに移動している。このように、移動運動を行う部分（図中 Forward slip の部分）は時間の経過とともに体の後方へと移動する。また、前端部と後端部の位相はほぼ一致しており、後端部が移動している時刻に前端部において次の伸張波が生じていることがわかる。

このような移動部分の伝播は、各体節の伸縮タイミングに起因する。図4は隣接した標点間の距離の時刻歴変化を示したものである。縦軸には標点間の距離をその平均値で割った縦歪を示す。図より、各標点間はある期間だけ伸張し、その他の時間には収縮していることがわかる。また、伸張波は前端から後端へと移動してゆくこと、伸張期間は前端で大きく後端で小さいことなどがわかる。

以上のように、ミミズの伝播している波動は、体の部位によって振幅や伸張期間、位相が異なり、そのパターンは支持面の摩擦係数によって変化していることがわかった。

また、筆者らは、ミミズの弾性をばねでモデル化してミミズの運動をシミュレーションした⁽⁴⁾。その結果、図4のような筋収縮パターンを入力すると、図3の運動パターンが得られることを確認した。なお、ミミズの体表面には剛毛と呼ばれる硬い毛が生えており、この方向を変化させることにより、前向きには滑りやすく後ろに向きには滑りにくいように地面との摩擦係数を変化させていることが知られている。シミュレーションの結果、この効果は重要であり、摩擦係数の前後不一致を考慮すると、ミミズの運動をよく再現できることがわかった。

以上のように、ミミズはかなり単純な波動を伝播することによって移動していることがわかった。では、このような運動のパターンはどのようにして生成されているのだろうか。筆者らは、ミミズを途中で切断し、切り離された前後の体を2

本の糸で接続した場合のミミズの運動を観察してみた。その結果、前方から伝播されてきた後退波は、糸を介して後ろ側の体にも伝達され、切断される前と同様な移動運動を生成できることがわかった。このことは、後退波が、神経を介してではなく、糸の張力を介して伝わっていることを示している。つまり、ミミズの各体節には張力を検出するセンサ（受容器）が備えられており、前側の体節が伸びて張力を感じると、自分も伸びる、といったような局所的なルールに基づいて全体の運動が生成されていると考えられる。

現在は、その局所的なルールとはどのようなものなのか、また、どのようなルールならば地面の凹凸や硬さなどの環境変化に対応して移動が可能であるか、等を調べているところである。

4. 超音波モータとは？

話は180度変わり、波動を伝播することによって運動を生成する人工物である超音波モータについて述べよう。

超音波モータは、低速・高トルク、高保持トルク、高制御性、静粛性、単純構造といった特徴を持つ新しいタイプのアクチュエータとして注目されており、1982年に新生工業の指田⁽⁶⁾により発明されて以来、多くの研究開発が行われてきた。これまでに様々なタイプの超音波モータが考案されており、その一部はカメラのAF（オートフォーカス）レンズの駆動用、ブラインドの開閉用といった用途に実用化されている。

最もポピュラーな超音波モータであるリング型超音波モータ⁽⁶⁾の駆動原理を以下に示す。この超音波モータはカメラのAFレンズ駆動用に実用化されたものである。図5はリング型超音波モータの回転子と振動子である。外径64mmの金属製の振動子は、7次の固有振動モード（上下方向に振動する7つの波が生じるようなモード）の固有振動数が32kHzとなるように設計されている。固有振動モードとは、弾性体の形状に固有な振動しやすい形である。下面には電気信号を変位に変換するための圧電素子（PZT、ジルコン酸チタン酸鉛）が接着されている。また振動子上面には円周

方向の変位を拡大するために突起（くし歯）が設けられている．アルミニウム製の回転子にはフランジ状ばねが設けられており，回転子が振動子に約15Nの加圧力で押し付けられるとき接触圧力を均一に保つ働きをする．圧電素子に空間的にも時間的にも位相を90度ずらせた2つの交流電圧を印加すると，振動子には7次面外曲げ振動の進行波が生じる．交流電圧の周波数は，共振によって進行波の振幅を拡大するために，振動子の固有振動数(32kHz)近傍とする．図6は振動子に進行波が生じたときの回転子の摩擦駆動状態の模式図（部分展開図）である．図より明らかなように，振動子内の進行波が右側に移動してゆくとき，くし歯先端の点Pは反時計回りに楕円運動する．このときくし歯先端に点接触する回転子は左側，すなわち進行波と逆方向に駆動される．なお，進行波の振幅は約1 μm ，進行波速度は約830m/s，点Pの接線方向速度は約200mm/s（回転数66rpm相当）である．

超音波モータは，振動子の振動状態により進行波型と定在波型に分類される．上述のリング型超音波モータは進行波型であり，振動子の移動子（回転子，直進子）との接触部には進行波状の振動が生成されており，振動子上のいずれかの点が常に移動子と接触している．接触のしかたから見ると，後退波を伝播させて移動するミミズとよく似ている．一方，定在波型振動子では，移動子との接触部全体が時間的に同位相で振動し，振動子と移動子は間欠的に接触する．こちらは，シャクトリムシやヒルの移動様式とよく似ている．

どちらの方式の超音波モータの場合も，金属の弾性体（振動子）に生じる複数の固有振動モードを利用する．振動子の形状と固有振動数を変えると，色々な形の超音波モータ，色々な駆動（回転または直進）が可能である．このため，固有振動モードは，曲げ振動以外にも様々なものが用いられる．たとえば棒の固有振動モードには，縦振動モード，曲げ振動モード，ねじり振動モードがある．振動モードの形に着目すると，縦振動はミミズの伸縮運動に，曲げ振動はヘビやシャクトリムシの曲げ運動に，それぞれ対応している点も興味

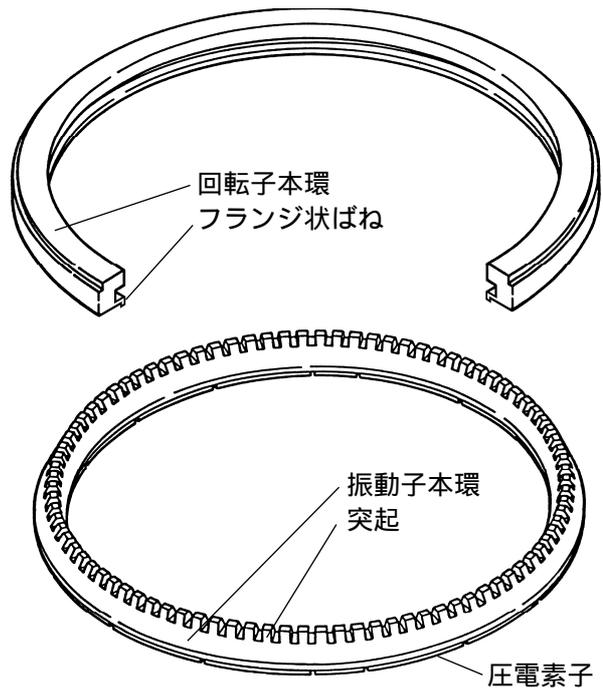


図5 リング型超音波モータ斜視図

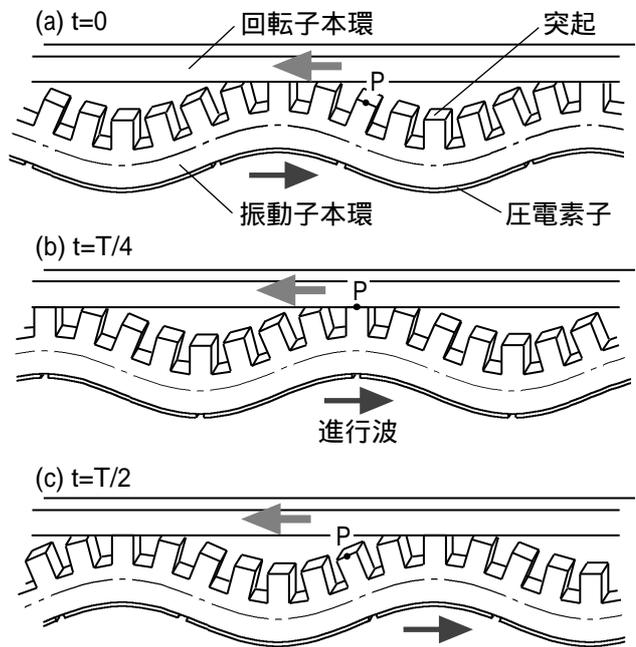


図6 リング型（進行波型）超音波モータの駆動原理の模式図（部分展開図）

深い。しかし、ねじり振動に対応し、ねじれながら移動する動物はいないようである。

超音波モータと生物の異なる点は、超音波モータの波動は、振幅が数 μm と非常に小さく周波数が20kHz以上と非常に大きいのに対し、生物の方は振幅が大きく周波数は小さい点である。たとえばミミズの縦振動の振幅は数10mm、周波数は1Hz以下であるから、振幅は超音波モータの数万倍、周波数は数万分の1程度である。また、大きく異なるのは、超音波モータでは弾性体の固有振動を利用しているのに対し、生物は受容器または神経系のネットワークに基づいて生成された運動パターンに基づいて移動する点である。しかし、いずれもその全体の形状に適した運動パターンを生成し利用している点、その運動が定在波または進行波といった波動であり、波の一部が対象物と接触して移動する点はよく似ている。

筆者らは、ミミズの場合と同様、リング型超音波モータの振動子と回転子の接触解析を行った⁶⁾。その結果、ミミズの場合と同様に、波動が伝播するにつれて局所的な滑り領域も伝播しながら回転子を動かしていることがわかった。超音波モータの振動子と回転子の摩擦係数は前後対称であり、この点はミミズとは異なる。人工物表面の摩擦係数を前後非対称にするのは難しいかも知れない。

現在、筆者らは、振動子の形状と固有振動モードを工夫する事によって回転子を3軸まわりに回転させることのできる多自由度超音波モータ⁷⁾や、生物的なアルゴリズムにより振動子の最適形状を自動生成する手法の研究などを行っている。生物と同様、多様な形と振動パターンを有する超音波モータのデザインが可能なのではないかと考えている。

5. おわりに

ミミズの運動と超音波モータの駆動原理を対比しながら、波動伝播に基づく移動メカニズムについて説明した。方やくによくよの生物、方やマイクロオーダーの波動を利用する精密機械と、全く異なるものようであるが、実は、いずれも構造体全体の形状によって決まる運動パターン（振動モード）とリズム（振動数）を利用している点、その運動が定在波または進行波といった波動であり、波の一部が対象物と接触して移動する点が、非常によく似ている。アナロジーは創造の源泉であると言われる。これからも、似ているようで似ていない、しかし似ていないようで似ている、生物と人工物の比較の中から、生物に関する理解が深まり、また、新たな人工物が創造されていくのではないだろうか。

参考文献

- 1) 広瀬茂男, 生物機械工学 - やわらかいロボットの基本原理と応用, 工業調査会, 1987
- 2) Shepherd, G. M. ほか, Neurobiology, Oxford Univ. Press, 1988
- 3) 現代生物学大系 無脊椎動物A, B, 中山書店, 1970
- 4) 前野, 立川, 山崎, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第一報, ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション), 日本機械学会論文集62巻603号C編, 1996, pp. 4264-4271
- 5) 指田, 超音波振動を利用したモーター装置, 特開昭55-125052, 1980
- 6) T. Maeno, T. Tsukimoto, and A. Miyake, Finite Element Analysis of the Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, No. 6, 1992, pp. 668-674
- 7) 前野, 竹村, 堀野, 小島, 多自由度超音波モータの駆動特性, 第16回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1998