

陸棲軟体動物の腹足による推進機構を規範とした腹足移動機構*

藤原綾潜^{*1}, 森川裕久^{*2}, 深谷祐矢^{*3}
酒井伸^{*4}, 小林俊一^{*2}Pedal-Like Locomotion Mechanism Modeled on Pedal Crawling
of Terrestrial GastropodRyousen FUJIHARA, Hirohisa MORIKAWA^{*5}, Yuya HUKAYA,
Hiroshi SAKAI and Shunichi KOBAYASHI^{*5} Department of Functional Machinery and Mechanics, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

When a snail is crawling on a ground, dark transverse bands appear on the sole of the snail and propagate from the posterior end of the foot to the anterior end. The dark bands are essentially the regions of longitudinal muscle contraction of the surface of foot, which form pedal waves. We paid attention to the manner of formation and propagation of the pedal wave. A pedal-like locomotion mechanism is developed of which moves forward by a pedal crawling like the snail. The pedal mechanism consists of eight units of the contraction mechanism which performs such a series of contraction motions as longitudinal contraction of the sole, lifting the sole surface and propagation of pedal wave by the use of a link mechanism and a SMA as actuator. As a result of the experiment on locomotion of the pedal mechanism, it was found that the locomotion velocity of the pedal mechanism was in proportion to both the propagation velocity of a pedal wave and the number of a pedal wave past on the sole per unit time, but an increase of the frequency of a pedal wave caused a decrease in traction of the pedal mechanism.

Key Words: Biomechanics, Terrestrial Gastropod, Pedal Locomotion, Shape Memory Alloy

1. 序 論

現在、考えられている移動ロボットの移動方式において、車輪式や多足歩行などの移動方法が持つ課題の一つとして、段差や凹凸などのある基盤上を移動する際に揺れや振動を発生し、また多様な基盤の状態に対応できないという点が挙げられる。そこで身近な生物の移動方式に目を向けたところ、陸棲軟体動物腹足類のカタツムリが、起伏形状や基盤状態に柔軟に対応して静かに振動することなく移動するという特徴があることに着目し、カタツムリが腹足表面において尾部から頭部に向けて波形を伝播させ前進する移動方法を規範とした腹足移動機構を考えた。腹足による移動方法は、例えば、家屋内で振動を発生することなく静粛に人を運ぶ福祉用移動補助機器などへの応用が期待できる。

これまでカタツムリの推進について James Gray⁽¹⁾は腹足が基盤に対して与える力を測定し、H.W.Lissmann⁽²⁾は腹足の動きと移動を風船を連結したモデルで表現したが、両者とも腹足の動きと基盤に働く力との関係は明らかにされていない。著者らは前報⁽³⁾において、カタツ

ムリの腹足表面の収縮状態、起伏状態および腹足が推進時に発生する推進力、垂直力を調べ、腹足運動のみに着目してカタツムリの推進時の腹足断面形状をモデル化し、腹足波形状と腹足表面収縮、腹足が発生する力の関係を明らかにした。一方、大野・広瀬⁽⁴⁾は屈曲と伸縮により多様な動作が可能な索状能動体を作製し、ヘビやカタツムリ等の5つの歩容タイプについて検討したが、カタツムリなど軟体動物の動きを模倣する機械に関する研究は少ない。

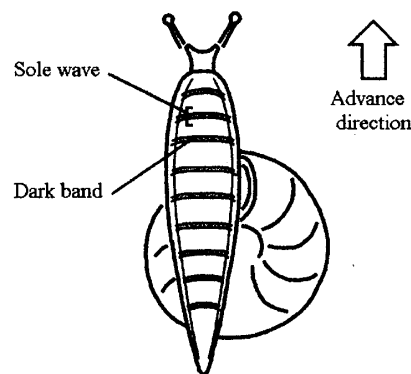


Fig. 1 Sole wave and dark band on sole of snail.

* 原稿受付 2003年9月1日。

^{*1} 正員, 信州大学大学院工学系研究科(☎386-8567 上田市常田3-15-1)。

^{*2} 正員, 信州大学繊維学部。

^{*3} 学生員, 信州大学大学院工学系研究科。

^{*4} 長野県工業試験場(☎380-0928 長野市若里1-18-1)。

E-mail: hmorikw@giptc.shinshu-u.ac.jp

そこで、本研究では前報⁽³⁾で得られた知見から、カタツムリが推進するときに行う腹足表面の収縮、持ち上げ（腹足波形成）、腹足波伝播の動作を実現するリンク機構を応用した腹足移動機構を試作し、バイオメカニクスの視点から、これら3つの動作からなる腹足による移動機構について検討することを目的としている。本報では、この試作機について腹足波伝播速度と機構全体の移動速度との関係や機構全体に発生する腹足波の数を変化させたときの腹足波振動数と機構全体の移動速度との関係、さらに牽引負荷を加えた場合の動作への影響について検討したので報告する。

2. 腹足推進と腹足断面形状モデル

図1に示すように、推進時のカタツムリの体の下面全体（腹足）には暗い縞模様が見られ、尾部から頭部に向かって伝播する腹足波と呼ばれる波形が発生し、腹足波の通過により体が前方へ運ばれ、この動作の繰り返しによってカタツムリは前進する。図2に、H. D. Jones⁽⁵⁾がナメクジの腹足断面の写真から得た斜筋構造の模式図を示す。カタツムリはナメクジと同様に前後方向に傾いた2種類の筋肉（前斜筋・後斜筋）を有しており、この2種類の筋肉を収縮させることによって腹足波を形成していると考えられる。⁽⁶⁾

腹足表面の収縮状態を考慮し、三角波を基本とした

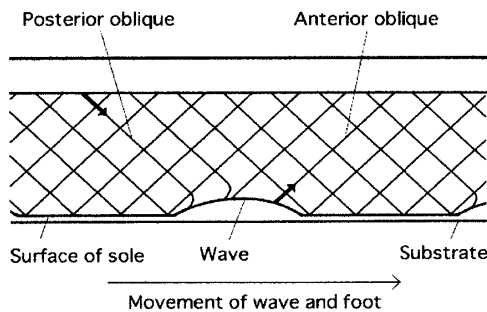


Fig. 2 Posterior and anterior oblique muscle⁽⁵⁾.

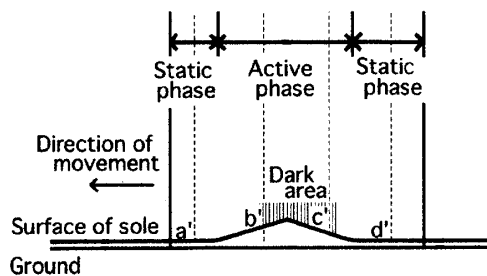


Fig. 3 Model illustrating the sole of a moving snail.

腹足波部の腹足断面形状モデルを図3に示す。腹足表面が筋収縮により持ち上がりかつ前方に移動する部分を **Active phase**、腹足表面が基盤に接し、移動しない部分を **Static phase** とした。推進時には **Active phase** と **Static phase** の2つの状態が交互に腹足表面を通過する。すなわち、カタツムリの腹足による移動は、**Active phase** における腹足表面の収縮と持ち上げ動作を腹足後端から進行方向に伝播させていくことによっておこなわれているといえる。⁽³⁾

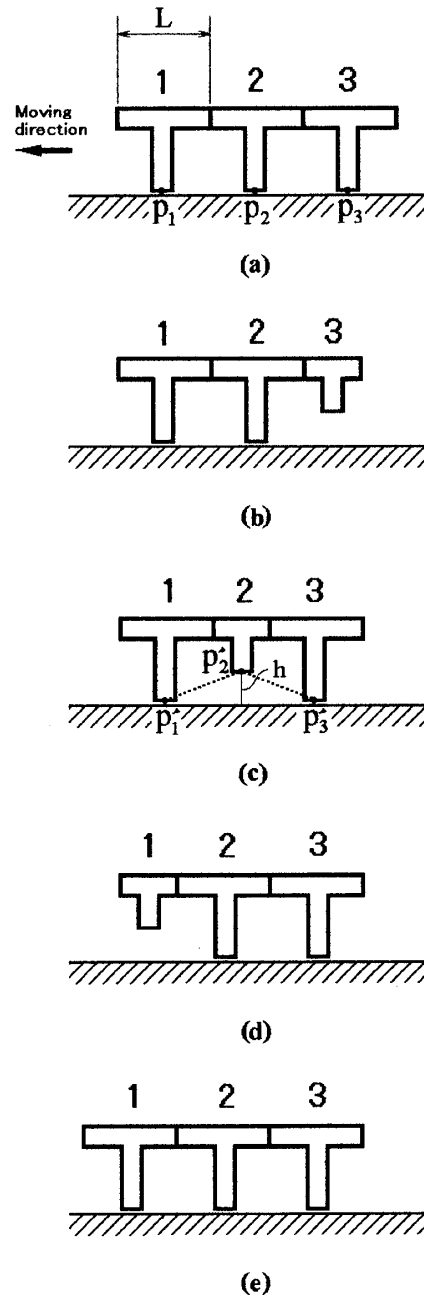


Fig. 4 Model illustrating pedal locomotion mechanism using T-shape units.

3. 腹足移動機構の動作原理

3.1 動作原理 腹足移動機構の一例として、腹足表面の Active phase を具体化する推進方向及び垂直方向に収縮運動をおこなう T 字型ユニットを推進方向に 3 個連結した腹足運動モデルを図 4 に示す。本モデルは、推進方向の収縮動作と垂直方向の収縮動作（持ち上げ動作）を後部ユニットから順次前方のユニットに伝播させることで移動する。図 4 を用いて、腹足移動機構の移動原理を説明すると、

- 初期状態はすべてのユニットが接地している。
- まず後部ユニット 3 が進行方向および垂直方向に収縮し、基盤より持ち上げられ腹足波を形成する。
- 中間部ユニット 2 が収縮し腹足波を形成するとともにユニット 3 は伸張し接地する。
- 前部ユニット 1 が収縮し腹足波を形成するとともにユニット 2 は伸張し接地する。
- ユニット 1 が伸張し接地することで、移動機構は初期状態と比較し前進する。

1 個の T 字型ユニットの収縮動作をリンク機構を用いて実現する収縮機構モデルを考え、図 5(a), (b) にそれぞれ水平方向、垂直方向の収縮機構モデルの座標を示す。図中、x 軸方向がモデルの側面方向で、y 軸方向がモデルの進行方向、z 軸方向が上下方向である。スライダ A およ

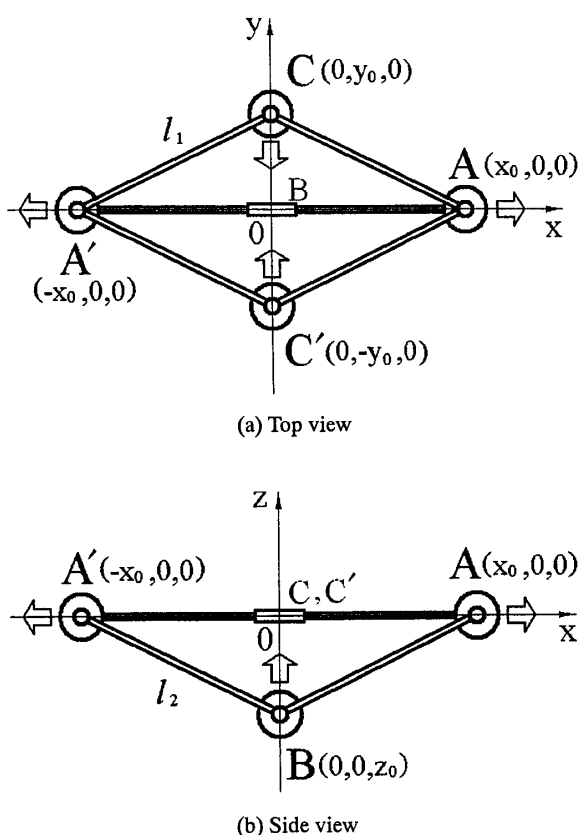


Fig. 5 Coordinate of contraction mechanism model.

び A が x 軸上を原点から離れる方向に動作することにより、連結部 C, C' は y 軸上を、接地部 B は z 軸上をそれぞれ原点方向へ変位する。なお、リンクの長さは $\overline{CA'} = \overline{A'C} = \overline{CA} = \overline{AC} = l_1$, $\overline{AB} = \overline{AB} = l_2$ であり、リンクの両端は回転自由である。

ここで、A, B, C のそれぞれの初期位置を $A(x_0, 0, 0)$, $B(0, 0, -z_0)$, $C(0, y_0, 0)$ とし、変位後の位置を $A(x_0 + \Delta x, 0, 0)$, $B(0, 0, -z_0 + \Delta z)$, $C(0, y_0 - \Delta y, 0)$ とすると、推進方向、垂直方向への変位量 $\Delta y, \Delta z$ は x 軸方向の変位 Δx が与えられることによりそれぞれ次式より求められる

$$\Delta y = y_0 - \sqrt{l_1^2 - (x_0 + \Delta x)^2} \quad (1)$$

$$\Delta z = z_0 - \sqrt{l_2^2 - (x_0 + \Delta x)^2}$$

以上、示したリンク機構を有するユニットを複数個連結することで、腹足運動と移動が可能となる。

3.2 推進速度 前述のモデル（図 4）の接地点に着目して、腹足波の伝播速度とモデル全体の推進速度との関係、および腹足波の振動数とモデル全体の推進速度の関係を求める。

ここでは、各ユニットの接地点を結んだ線を腹足表面とし、図 4(a) はすべてのユニットが接地している初期状態 ($p_1 p_2 p_3$)、(c) はユニット 2 が収縮し、腹足波 ($p'_1 p'_2 p'_3$) を形成している状態を表している。

前報⁽²⁾より、ひとつの腹足波の通過による腹足の前進距離 w は、モデルが腹足波を形成していないときの腹足表面長さ $\overline{p_1 p_3}$ とモデルが腹足波を形成しているときの波の部分の長さ $\overline{p'_1 p'_3}$ の差となる。

$$w = \overline{p_1 p_3} - \overline{p'_1 p'_3} \quad (2)$$

ここで、腹足波を形成しているときのユニットの収縮量は図 5(a) より $2\Delta y$ であるから、1 ユニットの非収縮時の推進方向長さを L とすると、

$$\begin{aligned} \overline{p_1 p_3} &= 2L \\ \overline{p'_1 p'_3} &= \overline{p_1 p_3} - 2\Delta y \\ &= 2L - 2\Delta y \end{aligned} \quad (3)$$

より

$$w = 2L - (2L - 2\Delta y) = 2\Delta y \quad (4)$$

これより、あるユニットを一つの腹足波が通過したことによるユニットの前進距離は、一つのユニットの水平方向の収縮量 $2\Delta y$ に等しい。

このとき腹足表面の平均収縮率 $\bar{\epsilon}$ は、腹足波の起伏高さを h （図 4-c）とすると、次式のように表される。

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{\overline{p_1'p_2'} + \overline{p_2'p_3'}}{p_1p_3} \\
 &= \frac{2\sqrt{(\overline{p_1'p_3'}/2)^2 + h^2}}{2L} \\
 &= \frac{\sqrt{(L - \Delta y)^2 + \Delta z^2}}{L}
 \end{aligned} \quad (5)$$

なお、腹足波の起伏高さ h は、ユニットの垂直方向の収縮量 Δz に相当する。

機構全体の移動速度 v は、腹足表面上の一点を通過する腹足波の振動数を f とすると、次式で表される。

$$\begin{aligned}
 v &= wf \\
 &= 2\Delta y f
 \end{aligned} \quad (6)$$

なお、振動数 f は腹足波の伝播速度 u 、および機構全体のユニット数 q によって決まる。例えば、腹足推進機構全体に一度に発生する腹足波の数がひとつのとき、振動数は次式のように表される。

$$f = \frac{u}{qL} \quad (7)$$

腹足移動機構全体に一度に発生する腹足波の数が k 個のとき、振動数は、

$$f = \frac{u}{qL} k \quad (8)$$

と表される。式(8)を式(6)に代入することにより、腹足波の伝播速度 u と腹足移動機構の移動速度 v との関係が次式のように求められる。

$$v = 2\Delta y u k / qL \quad (9)$$

4. 腹足移動機構

4.1 構成 腹足移動機構の1ユニットの模式図を図6に示す。本機構では、腹足波形成時にユニットが基盤から持ち上げられることと、腹足運動のゆっくりした動きを実現することを考慮し、図5に示す収縮機構モデルのスライダ A, A' を駆動するアクチュエータとして、小型、軽量で、必要な力を低速で発生することができる形状記憶合金 SMA (Dynalloy 社製、径 0.005inch, Ti-Ni : 50% - 50%) を用いた。この SMA はワイヤー状で収縮時には軸方向に 10 N 以上の力を発生する。しかし、軸方向収縮ひずみは 4% 程度である。本移動機構で用いたリンク機構は、SMA の軸方向収縮ひずみを拡大し、一組の SMA で推進方向と垂直方向の収縮を同時に行う構造となっている。

端部品(G)に固定された一組の SMA が収縮することにより、スライダ(A)は軸棒(F)に沿ってスライドし、スライダ(A)に水平リンク(D)と垂直リンク(E)を介して、それぞれ回転自由に取り付けられている連結部品(C)と接地部である底板(B)はそれぞれ軸棒(F)の方に移動する。その後、SMA の回復動作において、SMA はバイアスばね(H)の張力によりまっすぐに伸ばされた状態のまま徐々に伸長していき、初期状態に戻る。このとき SMA の長さが伸長するにしたがってスライダ部品(A)はバイアスばね(H)の張力により軸棒(F)に沿って引っ張られ、これにより連結部品(C)と底板(B)はそれぞれ軸棒(F)から離れる方向へ移動する。

中心部(J)と底板(B)の間には、ユニットが左右に傾くのを防ぐためにスポンジ(I)が挿入されており、スポンジ(I)は中心部(J)と底板(B)に接する面で接着されている。

図5に示したモデルに相当する本腹足移動機構の各部の寸法と初期位置は $l_1 = 22.0$ mm, $l_2 = 41.0$ mm, $y_0 = 15.1$ mm, $z_0 = 23.6$ mm, $L = 50.0$ mm, であり、ユニット数は $q = 8$ である。またモデルと本機構の異なる点として、本

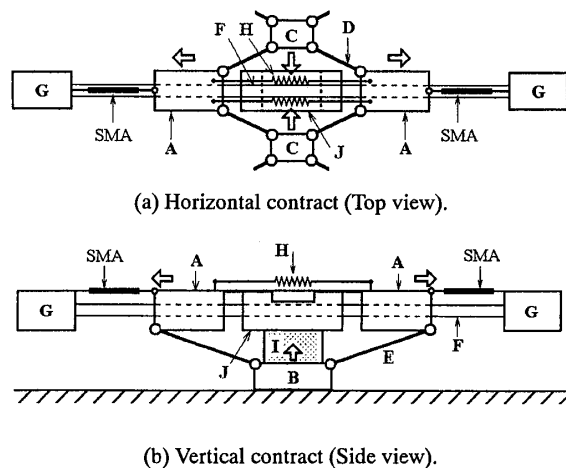


Fig. 6 Model of vertical and horizontal contraction mechanism for pedal-like locomotion mechanism unit.

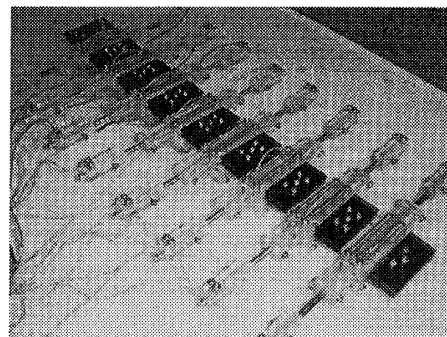


Fig. 7 Pedal-like locomotion mechanism.

機構では図5(a)に示すスライダA上でのリンクの回転中心と図5(b)に示すスライダA側面のリンクの回転中心に相当する位置が異なるため、推進方向変位(Δy)を求めるときは $x_0 = 16.0$ mm, また垂直方向変位(Δz)を求めるときは $x_0 = 33.5$ mm である。なお、一例として、本機構における SMA の収縮長さが $\Delta x = 4.1$ mm のときのユニット移動方向の平均収縮率は $\bar{\epsilon} = 0.89$ である。材料として、軸棒(F)にはステンレス棒、その他の部分にはアクリル板を用いた。

腹足移動機構は図7に示すように連結した8つのユニットで構成されている。全長 404 mm, 幅 228 mm, 高さ 40 mm, 重量は 788 g である。

4.2 制御方法 制御にはコントローラとしてパソコン(CPU: AMD K6-2 500 MHz)を採用し、インターフェースボード(Interface PCI-2726C)を用いた。

4.2.1 SMA の制御 SMA は、電圧を印加し加熱することにより収縮動作を行うが、電圧を印加し続けると過加熱により冷却しても元の長さに戻らなくなる危険性がある。また、電圧の増減により SMA の収縮量を一定に保つのは困難である。

そこで、SMA には図8に示すように一定電圧を ON と OFF を繰り返すパルス波として印加した。図中 T_1 はパルス列の印加時間長さ、 T_2 は1パルスの印加時間長さ、 T_3 はパルス間の時間長さである。パルス波として電圧を印加することにより、SMA の過加熱を防ぐとともに、 T_2 と T_3 を変えることで SMA の収縮速度を調整することができる。すなわち、 T_2 を長く、 T_3 を短く取れば、SMA は速く収縮し、逆に T_2 を短く T_3 を長く取れば SMA はゆっくりと収縮する。

なお、収縮した SMA が元の長さに回復する回復動作は、SMA に電圧パルスを印加しないときに行われる。すなわち SMA は、冷却は空気により自然冷却され、バイアスばねの張力によりまっすぐに伸長される。

4.2.2 ユニットの制御 図4に示した3ユニットのモデルを動作させた場合の制御例を図9に示す。図中 T_4 はあるユニットにパルス列電圧を印加し始めてから、その後、同じユニットに再び電圧を印加するまでの時間間隔をあらわす。

まず後端のユニット3にパルス電圧を加え水平方向と垂直方向の収縮動作をさせる。 T_1 経過後、ユニット3への電圧を遮断し、ユニット2にパルス電圧を加える。この操作によりユニット3は元の長さまで伸張し、ユニット2は収縮する。再び T_1 経過後、ユニット2への電圧を遮断し、ユニット1にパルス電圧を加え、ユニット2を伸張、ユニット1を収縮させる。さらに T_1 経過後、ユニット1への電圧を遮断し、ユニット1を伸張させ、1サイクルの動作が完了する。その後、最初にユニット3にパルス電圧を印加したときから時間 T_4 が経過したのち再

びユニット3にパルス電圧を印加し、次のサイクルの動作を開始する。 T_4 を短く設定すれば、例えば、ユニット1がまだ収縮している間にユニット3を収縮させることができ、機構全体に同時に複数の腹足波を発生させることができる。

以上のように、SMA の印加電圧の ON-OFF 時間長さ (T_2 , T_3), パルス波の印加時間 (T_1), および同じユニットに次の腹足波を発生させるまでの時間間隔 (T_4) を与えることで各ユニットの収縮、伸長および伝播の3つの動作を制御し、腹足移動機構の移動が実現される。

5. SMA の特性実験

腹足移動機構に使用する SMA の特性を得るために、SMA に対しパルス電圧 (ON 時間 $T_2 = 0.1$ s, OFF 時間 $T_3 = 0.1$ s) を印加し、SMA を収縮させ、SMA の電圧に対する収縮力 F_c および収縮量 δ を実験により求めた。測定は、室温 23 °C の部屋でおこなった。

5.1 SMA の収縮力特性 一定の長さ(200mm)の SMA の一端を固定し、他端にロードセルを接続し固定した状態で SMA の両端に直流電圧 E_i を印加し、SMA が発生する収縮力 F_c を測定した結果を図10に示す。収縮力 F_c は

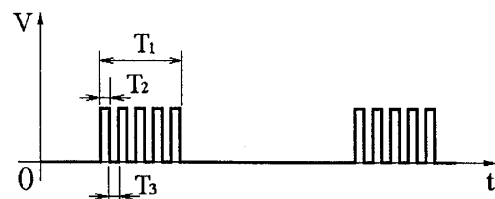


Fig. 8 Control of impressed voltage for SMA contraction of unit.

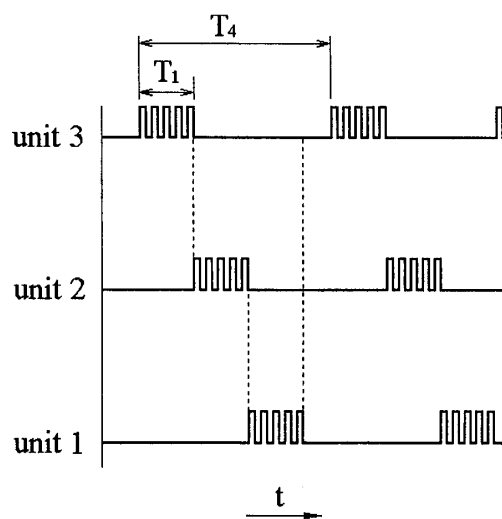


Fig. 9 Time control of impressed voltage for each unit of pedal-like locomotion mechanism.

$E_i = 4$ V 付近までは徐々に増加し, $E_i = 4$ V 付近から急激に増加し, $E_i = 9$ V 付近まではほぼ直線的に増加し, その後はほぼ一定となった.

5.2 SMAの収縮量特性 一定の長さ(200mm)のSMAの一端を固定し, 他端に滑車を介して一定の負荷(4.9 N)を加え, まっすぐに伸ばされた状態のSMAに電圧を印加し, SMAの収縮量を測定した. 印加電圧と収縮量の関係を図11に示す. 収縮量 δ は $E_i = 3$ V付近から印加電圧の増加とともに徐々に収縮量は増加し, $E_i = 5.5$ V付近で急激に増加し, さらに印加電圧を増加しても収縮量 δ はほとんど変化しなかった.

6. 腹足移動機構の動作実験

腹足移動機構の動作実験は室温 26 °C の部屋において, 平らな床面に敷いた記録用紙の上で行った. ユニットひとつに対して電圧 5.8 V, 電流 0.8 A を印加した. 腹足波が後端のユニットから先端のユニットまで伝播する動作を 1 サイクルとし, 電源投入後, 初期状態をそろえる

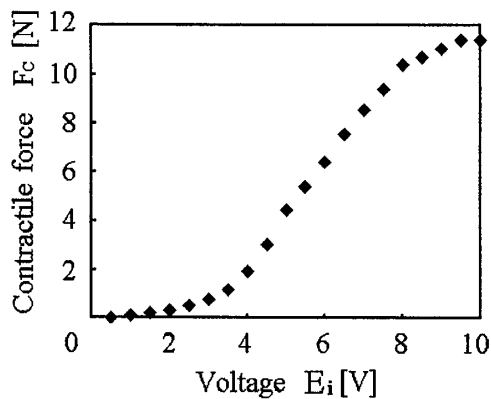


Fig. 10 Variation of contractile force of SMA for impressed voltage.

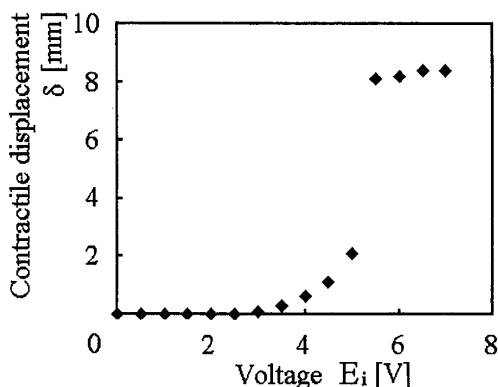


Fig. 11 Variation of contractile displacement of SMA for impressed voltage.

ために5サイクル動作させ, その後さらに10サイクル動作させた後に先頭のユニットが前進した距離を計測し, 移動速度を求めた. 測定はSMAの応答性が低下しない $u = 0 \sim 10$ mm/s の範囲でおこなった. SMAの平均収縮長さは $\Delta x = 2.3$ mm, 腹足波形成時の1ユニットの移動方向平均収縮長さ $2\Delta y = 5.6$ mm ($\Delta y = 2.8$ mm), また目視で確認した底板(B)の垂直方向変位 Δz はおよそ 1.5 mm であった.

6.1 推進速度と波の伝播速度との関係 $T_2 = 95$ ms, $T_3 = 105$ ms, $T_4 = T_1 \times q$ とし, 機構全体に常にひとつの腹足波が発生する状態($k = 1$)で T_1 を変化させた場合における腹足波の伝播速度 u と機構全体の移動速度 v の関係を, $\Delta x = 2.3$ mm として式(9)から求めた計算値とともに図12に示す. 腹足波の伝播速度 u が増加するに従い腹足移動機構の移動速度 v は上昇した. 実験値が計算値より小さくなったが, この理由として, 図4に示した移動原理においては, 腹足波が伝播する際に収縮運動中のユニットと, その後方の回復運動中のユニットの移動方向長さの合計は常に $2L - 2\Delta y$ に保たれたまま腹足波伝播がなされるが, 実験では, 腹足波を形成するユニットの収縮速度と隣接する回復動作するユニットの伸長速度が一定ではなかったため, 収縮運動を行うユニットと隣接する回復運動を行うユニットの移動方向長さの合計が $2L - 2\Delta y$ より小さくなることもあり, そのときに腹足波部より前方のユニットが僅かに後方へ引っ張られるためであると考えられる.

6.2 推進速度と波の振動数との関係 $T_2 = 95$ ms, $T_3 = 105$ ms とし, また $T_1 = 10.0$ s とすることで腹足波の伝播速度を一定値 $u = 5$ mm/s とした状態で T_4 を変化させた場合における腹足波の振動数と機構全体の移動速度 v との関係を, $\Delta x = 2.3$ mm として式(6)から求めた計算値とともに図13に示す. ここでは式(8)より振動数 f の増加は腹足移動機構全体に発生する腹足波の数 k の増加によることを意味している. 腹足移動機構の移動速度 v はあるユニットを通過する波の振動数 f が増加するに従って増加したが, 実験結果の移動速度 v は計算値より小さくなった. この理由としては 6.1 と同様に腹足波伝播時に腹足波部より前方のユニットが僅かに後方へ引っ張られるためであると考えられる.

6.3 牽引負荷の影響 移動方向と逆の方向に負荷 F_L を加えた状態で腹足移動機構を動作させ, 移動速度を測定し, 機構の移動に対する牽引負荷の影響を調べた. $T_1 = 5.0$ s, $T_2 = 95$ ms, $T_3 = 105$ ms とし, 腹足波の伝播速度は一定値 $u = 10$ mm/s として機構全体に発生する腹足波の数 k を 3 通りに変化させた場合における負荷 F_L と腹足移動機構の移動速度との関係を図14に示す. なお, 腹足波の数 k と振動数 f との対応は, $f = 2.5 \times 10^{-2}$ Hz ($k=1$, $T_4=T_1 \times q$), $f = 3.3 \times 10^{-2}$ Hz ($k=4/3$, $T_4=T_1 \times 3q/4$), $f = 5.0$

$\times 10^2$ Hz ($k=2$, $T_4=T_1 \times q/2$)である。

本実験範囲内では、最大牽引力は $f = 2.5 \times 10^{-2}$ Hz ($k=1$)において $F_1=0.34$ Nであった。一定の振動数では牽引力が増加するに従い移動速度は減少した。また振動数の増加は牽引力の低下をもたらした。腹足移動機構に一

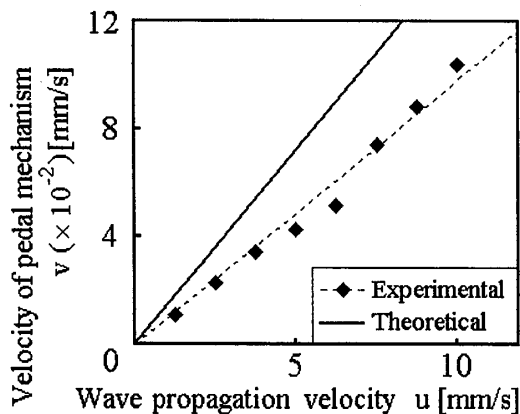


Fig. 12 Relationship between wave propagation velocity and locomotion velocity of pedal mechanism ($k=1$, $q=8$).

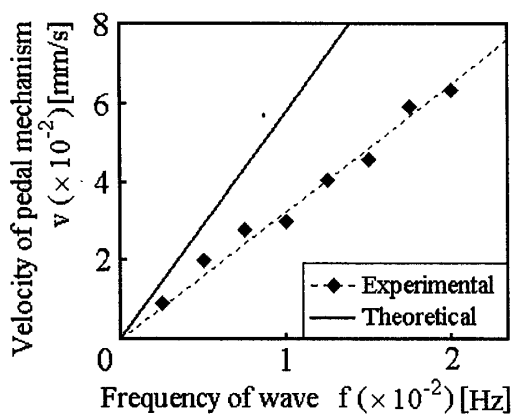


Fig.13 Relationship between wave frequency and locomotion velocity of pedal mechanism ($q=8$).

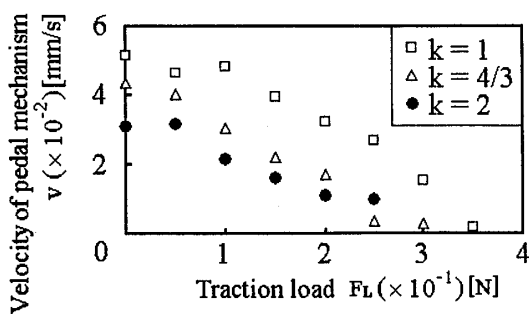


Fig. 14 Relationship between traction load and locomotion velocity of pedal mechanism ($q=8$).

度に発生する波の数が増えることは、腹足移動機構の基盤に接するユニット数が減ることを意味する。それにより腹足移動機構の基盤に接する面積が減少し、基盤との間の摩擦抵抗が牽引負荷より小さくなったときに、腹足移動機構全体が僅かに後方へ滑るため、移動速度が減少したと考えられる。

7. 結 論

以上、カタツムリが推進するときに行う腹足表面の収縮、持ち上げ（腹足波形成）、腹足波伝播の動作を表現するリンク機構を応用した腹足移動機構を試作し、動作試験を行い、機構の移動速度および機構の牽引力に対する腹足波の伝播速度や発生させる波の数の影響を調べた。その結果、腹足波が伝播することによって腹足移動機構が前進することが確認され、腹足波の伝播速度の増加、また腹足波の数の増加とともに腹足移動機構全体の移動速度は速くなるがことがわかった。また振動数の増加は牽引力の低下をもたらした。

今後の課題として、ユニット列を左右2列にし、2つのユニット列の相対移動速度を変化させることで、移動速度の遅い列の側へ移動方向を変える方向転換機能を持たせたり、また隣り合うユニット同士の接続部を回転自由とすることで、腹足移動機構を基盤の起伏形状に沿って変形しながら移動させ、段差を乗り越える機能を持たせることなどを旨したい。

謝 辞

本研究は文部科学省 21 世紀 COE の助成を受けた。

文 献

- (1) James Gray ; Animal Locomotion, Weidenfeld and Nicolson, 421-434, (1968).
- (2) H.W.Lissmann ; The mechanism of locomotion in gastropod molluscs. II Kinetics, J.Exp.Biol, 22, 37-50, (1945).
- (3) 藤原, 森川, 小林; 陸棲軟体動物の腹足移動機構に関する研究, 日本機械学会論文集, (C編),67 巻 658, 1934-1940, (2000).
- (4) 大野, 広瀬 ; 索状能動体に関する研究(3D 歩容に関するバイオメカニズム的考察), 日本設計工学会誌, 36 巻 5 号, 213-219,(2001).
- (5) H. D. Jones ; Circulatory pressures in Helix pomatia, L. Comp. Biochem. Physiol., 39A, 289. (1971).
- (6) R.Alexander and G.Goldspink ; Mechanics & energetics of animal locomotion, Chapman and Hall, (1974).