

波動伝播に基づく移動機構の研究 (第2報, 体節の変形を考慮した細長動物の構造モデル)*

土屋 学*1, 前野隆司*2, 山崎信寿*2

Frictional Driving Mechanism Based on Wave Propagation (2nd Report, Model of Earthworm-like Structure Considering Deformation of the Body)

Manabu TSUCHIYA, Takashi MAENO and Nobutoshi YAMAZAKI

Earthworm move on the complex uneven ground by its own peristalsis. Therefore, earthworm-like structure can be applied to a mobile robot which moves autonomously in a narrow pipe or on an irregular ground. In this study we propose a simple two-dimensional link model consists of flexible bar elements we capable of calculating the locomotion pattern of the soft creatures including an earthworm. Calculated locomotion pattern of the earthworm-like structure is similar to the measured ones. It is found that the earthworm-like structure can move at a constant speed on the plane ground when friction coefficient is large enough. It is also found that the earthworm can move even when there is a projection or several segments are broken down.

Key Words : Biomechanics, Bio-motion, Earthworm, Contact, Friction, Wave Propagation, Neural Network

1. 緒 言

ミミズに代表される細長形状の機構は、車輪や二足歩行に比べ、より冗長な自由度を持ち、対象物の形状に自らの形状を合わせて大きな接触面積を保ちつつ移動するため、生体内部や災害現場のように形状が複雑で空間的制約が厳しい場所の移動が可能である。このため、近年、ヘビやミミズを模倣した移動機構⁽¹⁾⁻⁽³⁾の製作が試みられている。なかでも、ミミズは、伸縮波の単純な伝播に基づき対象面に多点で接触しつつ移動するため、環境に適応した安定的な移動が可能である。その上、移動に必要な空間体積が小さいので、配管や血管などの穴の中での移動に適している。また、ミミズは、ほぼ単一構造と見なせる体節が連なった繰り返し構造より成るため、構築容易性および耐故障性に優れている。

このため、筆者らは、ミミズなどの細長生物が力学的構造、神経系による運動制御機構、運動する環境の相互作用に基づいて移動運動を生成する機構を明らかにすることによって、生物型自律分散システムの可能性と限界

を明らかにすることを試みている。従来の自律分散システムの議論では、システム内部の挙動を明らかにすることに重点が置かれていたが、そのみでなく、環境とインタラクションする体表面、すなわち接触部における力学的挙動を厳密にモデル化することが重要であると考えられる。そこで、筆者らは、ミミズと対象面との接触状態に着目し、ミミズの運動を計測するとともに、体表面に接触ばねを有するモデルを用いてミミズの移動運動シミュレーションを行った⁽⁴⁾。この結果、実際のミミズの移動パターンと前後非対称な摩擦係数は、移動速度および機械的効率の面から妥当であることを明らかにした。しかし、このモデルでは、体節間に作用する内力は無視しており、ミミズのからだ全体の連続体としての特性は考慮していない。また、外力による体節の変形を考慮していないため、曲がった管路や不整地での移動運動の生成を行うことができない。ミミズなどの細長生物が移動運動を生成する機構を明らかにするためには、さらに、体節の変形を考慮した力学的構造のモデル化と、感覚受容器や自己受容器を考慮した神経回路による運動制御機構のモデル化を行う必要がある。

本報では、体節の変形を考慮した伸縮リンク機構を用いてミミズの構造をモデル化する。また、有限要素法に

* 原稿受付 平成10年

*1 学生員, 慶応義塾大学院 (223 横浜市港北区日吉3-14-1)

*2 正員, 慶応義塾大学理工学部

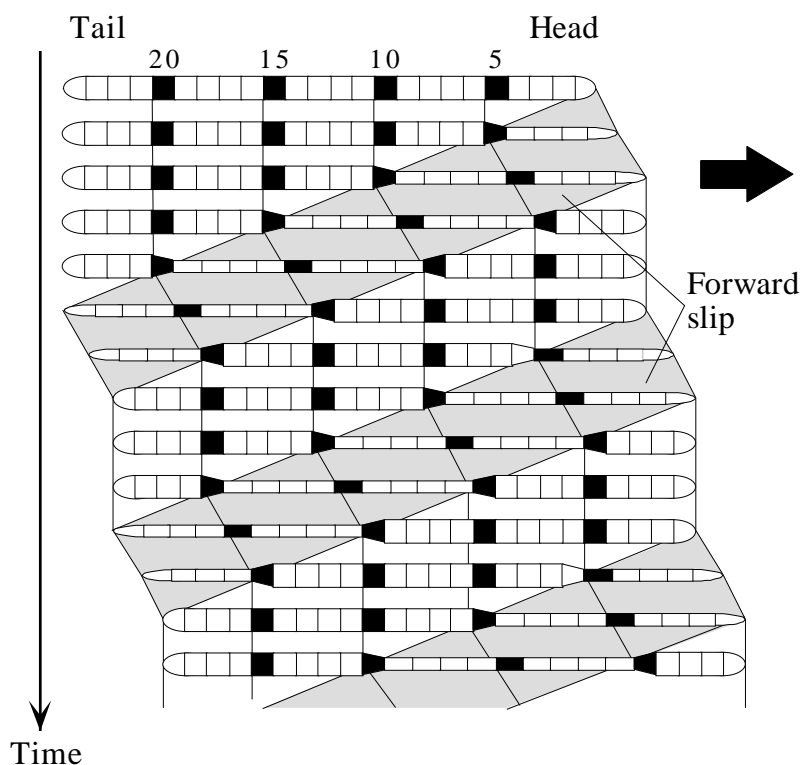


Fig.1 Locomotion Pattern of earthworm⁽⁵⁾

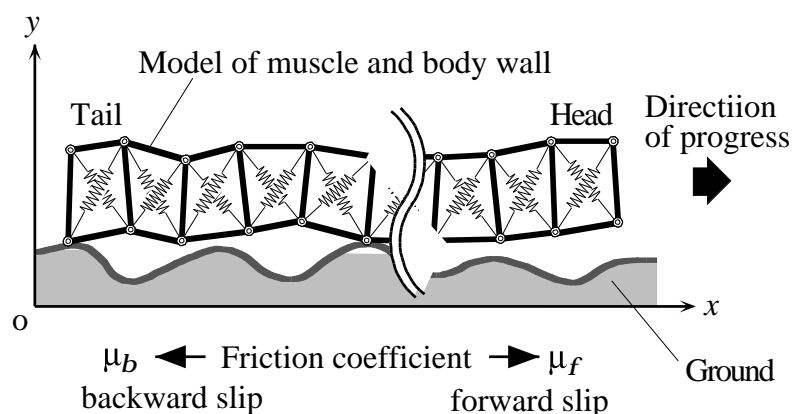


Fig.2 Flexible earthworm-like structure

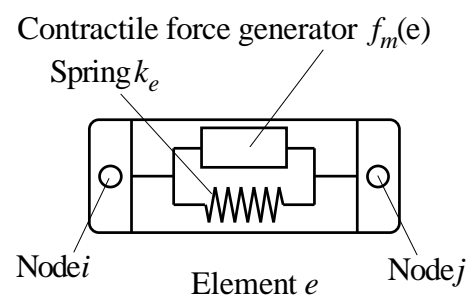


Fig. 3 Model of muscle and body wall

よる定式化を行うとともに接触機構の解析手法を提案し、いくつかの場合について移動運動シミュレーションを行う。また、構造モデルとその解析結果に対する考察を行い、本モデルの発展可能性と限界について論じる。

2. モデル解析

ミミズのような柔軟生物の力学系および環境との接触状態を以下のようにモデル化した。

2.1 構造と筋のモデル化 ミミズは連続的に連なった多くの体節から成る。各体節には体腔があり、体腔の周囲の体壁は外側からクチクラ表皮・筋肉・体腔上皮の層から成る。筋肉は2層に分かれ、外側は環状筋、内側は縦走筋と呼ばれる。環状筋は周方向に収縮し、その体節の直径を減少させる。また、縦走筋は長手方向に収縮し、体節を長手方向に短くする⁽⁵⁾。また、各体節は隔壁で区切られており、体節内部には体腔液が充填されている。それぞれの体節の伸縮運動は連成しており、基本的には図1に示したように、伸びて細くなっている部分が前方に向けて滑るとともに、この伸びた部分が後方に伝播してゆくことにより移動する。

このようにミミズのような柔軟生物は、構造体として体を支える体壁や隔壁が筋肉と同時に変形する点が、内骨格や外骨格を有する生物とは根本的に異なっている。以上のようなミミズのからだについて、以下のような仮定に基づきモデル化を行う。

1) 移動速度は緩やかであることから慣性力は無視し、

静力学的解法によりモデルの変形を求める。

- 2) ミミズの進行方向に沿った鉛直方向の2次元平面内(矢状面内)の運動に着目する。したがってモデルは、矢状面内の2次元モデルとする。
- 3) 筋収縮に応じたからだの変形と対象面との接触状態をできるだけ単純化し、図2に示す2次元リンク構造を用いて力学的にモデル化する。各リンクは、筋と体壁をモデル化した図3に示す伸縮可能1次元要素より成る(Model of muscle and body wall, 図2と図3では表示形式が異なるが、同じ要素である)。1次元要素を4つ、四角形にピンジョイント結合することによってミミズのからだを構成する。2次元リンクモデルの水平方向の要素が縦走筋の機能を、鉛直方向の要素が環状筋機能を代替するものとする。
- 4) ピンジョイント部でモーメントは伝達されないものとする。
- 5) ミミズの体腔内を満たす体腔液により体節の体積がほぼ一定に保たれる効果は、体節内に十字状に配した2本の線形弾性要素(以下補助要素と呼ぶ)によって代用する。補助要素の質量は無視する。

以上の仮定は、水平面内の蛇行運動を解析することはできないが、矢状面内の運動を解析するために十分な構造モデルである。

また、ミミズの移動運動の計測結果⁽⁴⁾との比較を容易にするために、計測に用いたミミズ（体長約70mm，直径約5mm）と同程度の大きさのモデルを作成した。実際のミミズは約150個の体節にわかれているが、本研究の計算では体節の形状をほぼ正方形として、体節内の十字状補助要素の効果が縦走筋と環状筋の双方に均等に加わるようにした。体節数は20とした。

筋収縮のための筋への入力 は 運動ニューロンからの神経インパルスであり、出力は筋の収縮力である。筋収縮の力学的特性は、マクロ的には張力 - 長さ曲線，張力 - 速度曲線という2つの基本関係で表されることが知られている。つまり、筋はその長さが長くなるにつれて弾性が増加する可変弾性特性を持つこと、また、筋の収縮速度に反比例して筋力が減少するという可変粘性特性を持つこと、そして、筋力は筋の活動レベル（運動ニューロンからの神経インパルスの頻度）に応じて増加することなどの特徴を持つ⁽⁶⁾。

本研究は、筋そのものの挙動よりもミミズの巨視的な運動をモデル解析することが目的であるので、以下の仮定に基づき筋のモデルを簡略化する。

- 1) 1次元要素はその長手方向のみに伸縮するものとする。
- 2) 筋の力発生器の働きと弾性特性を考慮するため、1次元要素内には、収縮力発生要素と弾性要素が並列につながれているものとする（図3参照）。
- 3) 筋の短縮速度はヒトなどの骨格筋に比べ緩やかであり、その変化の幅も小さいと考えられる。このため、筋の粘性特性は無視する。
- 4) 筋の張力と長さは本来非線形関係にあるが、本研究では簡単のため線形近似する。
- 5) 1次元要素内の弾性要素は筋の弾性および表皮、クチクラ等の表面軟組織の弾性をモデル化しているものとする。
- 6) 神経の入出力は本来離散的なパルスであるが、数学的な扱いやすさのため連続的な関数とする。

移動のために大きな収縮を行うカタツムリの足部の筋肉では、伸長にともなう静止張力の増大は非常に緩やかであり、その弾性係数は5.0[N/m]前後である⁽⁷⁾。ミミズの筋の弾性係数はカタツムリと同程度と考えられるので、環状筋および縦走筋の弾性係数 k_r, k_l を、それぞれ3.0[N/m]，1.0[N/m]とした。最大収縮時のひずみがミミズの1体節のひずみの計測値⁽⁴⁾とほぼ一致するように、補助要素の弾性係数 k_c は3.00[N/m]，筋の最大

収縮力は縦走筋では0.002[N]，環状筋では0.004[N]とした。

2・2 剛性方程式 前節で述べた収縮リンク要素とばね要素を相互に連結した2次元リンク構造モデル（図2）に対し、有限要素法の考え方の基礎である一般的構造解析法を用いて定式化を行う⁽⁸⁾。

モデルの絶対座標系の原点は、モデル最後端腹側の節点の初期位置（ $t=0$ ）にとる。図4に示すように、任意要素 e の両端の節点番号を i と j （ $i < j$ ）とする。各節点の時刻 t のときの絶対座標系における位置ベクトルを、

$$\mathbf{x}_k(t) = \begin{pmatrix} x_k(t) \\ y_k(t) \end{pmatrix} \quad (k = i, j) \quad (1)$$

とし、 $\mathbf{x}_k(0)$ を原点として、各節点ごとの局所座標系 $u-v$ を絶対座標系と平行にとる。そして、各節点の初期位置（ $t=0$ ）からの変位ベクトルを、

$$\delta_k(t) = \begin{pmatrix} u_k(t) \\ v_k(t) \end{pmatrix} \quad (k = i, j) \quad (2)$$

とする。また、要素 e の方向ベクトルを、

$$\mathbf{l}_e(t) = \mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t) \quad (3)$$

とし、 $\mathbf{l}_e(t)$ が x 軸の正の方向となす角を $\theta_e(t)$ とする。

重力加速度を g ，要素の質量を m とし、その自重は要素の両端の節点に2分の1ずつ加わるものとする。また、要素 e の力発生器の出力を f_{mus}^e （収縮力を正とする）、弾性要素の弾性係数を k_e とする。また、要素 e の節点 i, j には外力 \mathbf{F}_i と \mathbf{F}_j が働いているものとし、 $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j$ の u 成分を F_i^u, F_j^u ， v 成分を F_i^v, F_j^v とする。

このとき、2次元リンク構造モデルの各要素 e が満たす剛性方程式は、

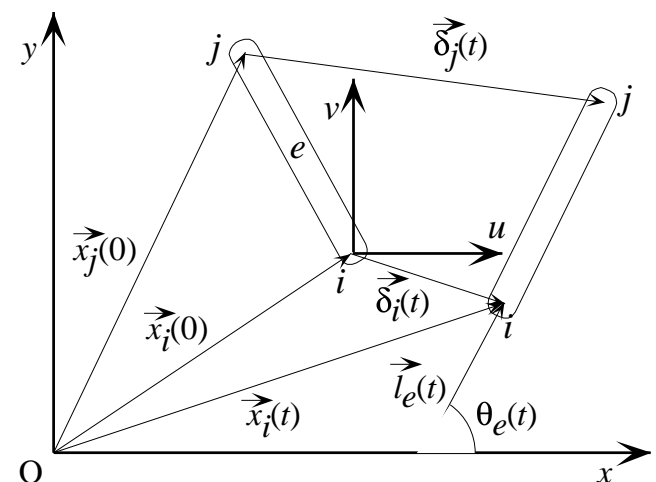


Fig.4 Model of link element

$$\begin{array}{cccccc}
k_e c^2 & k_e cs & -k_e c^2 & -k_e cs & u_i & \\
k_e cs & k_e s^2 & -k_e cs & -k_e s^2 & u_j & \\
-k_e c^2 & -k_e cs & k_e c^2 & k_e cs & v_i & \\
-k_e cs & -k_e s^2 & k_e cs & k_e s^2 & v_j & \\
\end{array}$$

$$= \begin{array}{cc}
f_{mus}^e c & F_i^u \\
-f_{mus}^e s & F_j^u - mg / 2 \\
f_{mus}^e c & F_i^v \\
-f_{mus}^e s & F_j^v - mg / 2
\end{array} + \quad (4)$$

(ただし, $c = \cos \theta_e(t)$, $s = \sin \theta_e(t)$.)

となる. 要素 e の満たす剛性マトリクスを $[K_e]$, 両端の節点の変位ベクトルを $\{\xi_e\}$, 要素の内力ベクトル (筋の収縮力) を $\{F_e^{ele}\}$, 要素の両端節点に働く外力ベクトルを $\{F_e^{node}\}$ とすれば, 式(4)をまとめて,

$$[K_e]\{\xi_e\} = \{F_e^{ele}\} + \{F_e^{node}\} \quad (5)$$

と表すことができる.

要素 e についての剛性方程式(5)を, 全要素について重ね合わせたものが全体の剛性方程式となる. 2次元リンク構造モデルの全節点数を n とする. 全体の剛性方程式を記述するために, モデルの剛性を表す $2n \times 2n$ のマトリクス $[K]$, 全節点の変位を表す $2n \times 1$ の列ベクトル $\{\xi\}$ を考える. また, 節点力ベクトルとして, 要素内で働く力を表す $2n \times 1$ の列ベクトル $\{F^{ele}\}$ と節点に働く外力を表す $2n \times 1$ の列ベクトル $\{F^{node}\}$ を考える. このとき, 全体の剛性方程式の一般表示形は,

$$[K]\{\xi\} = \{F^{ele}\} + \{F^{node}\} \quad (6)$$

となる.

全体の剛性マトリクス $[K]$ は, 各要素の剛性マトリクス $[K_e]$ の成分を全体マトリクスの適当な位置にはめ込むことによって作られる. 式(6)を準静力学的に各時間ステップごとに解くことによって, モデルの運動状態を求めることができる.

2.3 接触状態のモデル化 ミミズは, 剛毛の効果により進行方向には滑りやすく, 後方に滑りにくいという摩擦特性を持つ. このため, 前報(4)同様, モデルと対象面との静止摩擦係数と滑り摩擦係数は等しいと仮定し, 前進時および後退時の摩擦係数をそれぞれ μ_f, μ_b とする. なお, $\mu_f < \mu_b$ である. 紙面上でのミミズの動摩擦係数が0.3程度(4)であることおよび剛毛の効果

に基づき, $\mu_f=0.2, \mu_b=1.0$ とした.

モデルが x 軸の正の方向に滑る場合の摩擦係数を μ_f , 負の方向に滑る場合の摩擦係数を μ_b とする.

実際のミミズは, 広範囲で連続的に対象面と接触しているが, 本研究では2次元リンクモデルの各節点に離散的に接触力が加わると仮定し, 前報(4)で提案した手法を拡張して接触解析を行った. すなわち, 各節点が接地するか否か, 固着するか否かを判定する収束演算により接触状態の履歴を求めた. 前報と異なる点は, 前報では接線方向の釣り合い式と法線方向の釣り合い式が連成しなかったため, 接線方向の固着・滑り状態と法線方向の接触・非接触状態を独立に扱うことができたのに対し, 本解析では剛性方程式(6)を1度に解くため, 接触状態をも1度に解く必要がある点である. 図5に接触解析の流れ図を示す. この図に沿ってモデルの接触解析手順を説明する.

地表面の y 座標は, 絶対座標系 (x - y 座標系)において次式で表される関数で与えられているものとする.

$$y = y_{surface}(x) \quad (7)$$

節点の接触状態は, 「固着」(stick), 「滑り前進」(forward slip), 「滑り後退」(backward slip), 「非接触」(non-contact)の4つの状態に分けられる.

計算の時間間隔は Δt とする. 任意の時刻 t における接触状態を求めるために, まず, 時刻 $t-\Delta t$ における接触状態を用いて時刻 t における接触状態収束演算の初期値を仮定する. つまり, 時刻 $t-\Delta t$ において接地, すなわち「滑り」または「固着」であった節点は, 時刻 t において $(x_i(t-\Delta t), y_i(t-\Delta t))$ の位置で「固着」していると仮定する. また, 時刻 $t-\Delta t$ において非接触であった節点は, 時刻 t においても「非接触」とであると仮定する(図中). この仮定のもとで次のような計算を行う.

「非接触」と仮定した節点は, 接触面から受ける反力は0であるが, x 座標, y 座標が共に未知である. 「滑り前進」または「滑り後退」と仮定した節点は, 接触面から受ける反力の法線方向成分 F_i^N と x 座標が未知である. 「固着」と仮定した節点は, その位置 $(x_i(t-\Delta t), y_i(t-\Delta t))$ は既知であるが, 反力の法線方向成分 F_i^N と接線方向成分 F_i^T が未知である. 以上のように, それぞれの節点に対して仮定した接触状態に応じて求めるべき未知数を決定する().

次に式(6)を解く. 本モデル場合, 84元連立1次方程式で表される剛性方程式を解き, 上述の未知数を求める. 次に, 以下の手順に従い, 接触状態を評価する.

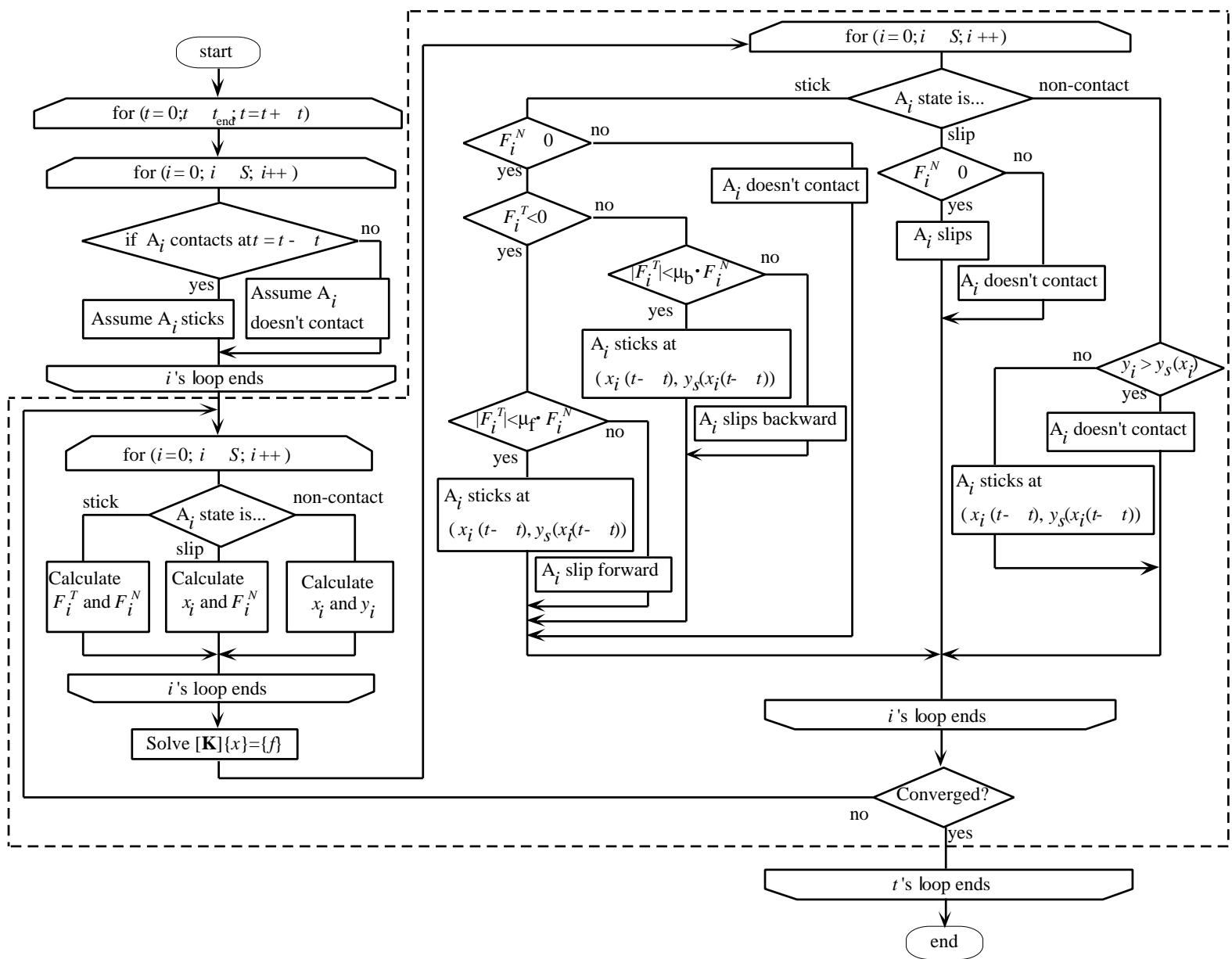


Fig. 5 Flowchart of contact analysis for earthworm locomotion

「非接触」と仮定した節点において， x 座標， y 座標の計算結果が，

$$y_i > y_{surface}(x_i) \quad (8)$$

を満たしているならば，節点は対象面から離れていることになるので，計算の結果得られた接触状態も当然「非接触」とみなせる．一方， x 座標， y 座標の計算結果が，

$$y_i < y_{surface}(x_i) \quad (9)$$

を満たしているならば，節点が対象面にめり込んでいることになるので，接触状態を「固着」に変更する（ ）．

「滑り前進」または「滑り後退」と仮定した節点において，接触面から受ける反力の法線方向成分 F_i^N の計算結果が，

$$F_i^N < 0 \quad (10)$$

を満たしているならば，計算によって得られた接触状態も前の仮定の通り「滑り前進」または「滑り後退」のま

まとする． F_i^N の計算結果が，

$$F_i^N < 0 \quad (11)$$

を満たしているならば，反力の法線方向成分が負であるので，接触状態を「非接触」に変更する（ ）．

「固着」と仮定した節点において，反力の法線方向成分 F_i^N と接線方向成分 F_i^T の計算結果が，

$$F_i^N > 0 \text{ かつ } F_i^T < 0 \text{ かつ } |F_i^T| < |\mu_f \cdot F_i^N| \quad (12)$$

を満たすならば，節点は x 軸の正の方向にせん断力を受けているものの，反力の接線方向成分が最大静止摩擦力以下である．よって，節点は滑り出さないで，接触状態を「固着」のままとする． F_i^N と F_i^T の計算結果が，

$$F_i^N > 0 \text{ かつ } F_i^T < 0 \text{ かつ } |F_i^T| > |\mu_f \cdot F_i^N| \quad (13)$$

を満たすならば，節点は x 軸の正の方向にせん断力を受けており，反力の接線方向成分が最大静止摩擦力以上である．したがって，節点は前の方向へ滑るので，接触状

態を「滑り(前進)」に変更する。()

F_i^T が正の場合()も、と同様、反力の大きさによって接触状態を「固着」または「滑り(後退)」とする()。

また、 F_i^N が、

$$F_i^N < 0 \quad (14)$$

を満たすならば、反力の法線方向成分が負であるので、接触状態を「非接触」に変更する()。

次に、計算結果より求めた接触状態と、計算の前に仮定した接触状態とを、接触する可能性のある全節点について比較する。そして、接触状態が一致しない節点が残っている場合は、新たに求めた接触状態のもとに上記の計算を繰り返す。計算結果と計算前に仮定した接触状態が全節点で一致した場合、収束とみなす。数回の繰り返しを行えば、時刻 t における接触状態の収束解が得られる。すなわち、固着点では最大静止摩擦力以下の摩擦力、滑り点では動摩擦力が加わるような解が求まる。

次に、時刻を Δt 進め()、同様な操作を繰り返す。各時間ステップごとに解を求めることにより、ミミズの移動状態の時刻歴を求めることができる。

3. 解析結果

モデルの妥当性を確認するためにいくつかの計算を行った。以下に解析結果を示す。

3.1 実験結果との比較 前報⁽³⁾において計測したミミズの移動運動の計測データを基に、筋の収縮パターンを与えた。すなわち、体節内で環状筋の収縮を司る神経の出力と縦走筋の収縮を司る神経の出力とが拮抗関係にあり、交互に発振するものとした。また、それぞれの筋の収縮パターンは、位相を遅らせながら後方に伝播していくようなパターンとした。図6に筋収縮パターンを示す。位相差と振幅を調節しながら移動運動の生成を行った結果、モデルは図7に示したような移動状態を呈した。時間の経過とともに、体節が伸びている部分が後方に伝播するとともに、全体としては前進していく様子がわかる。また、モデルの先端から後端までを5等分した6つの位置の時刻歴変化を図8に示す。図9には前報⁽³⁾の計測結果を示す。図8のパターンは図9に示す計測結果⁽³⁾とよく一致している。

3.2 摩擦係数の影響 ミミズの移動運動に及ぼす摩擦係数の影響を調べた。 μ_f を 0.2, 0.3, 0.4 とし、 μ_b を0.25から1.0の間で変化させ、上述の筋収縮パターンを用いて計算した場合の、摩擦係数と移動速度の関係を図10に示す。摩擦係数 μ_b が小さくなると移動速度は減少するが、 μ_b が十分に大きいときには移動速度は

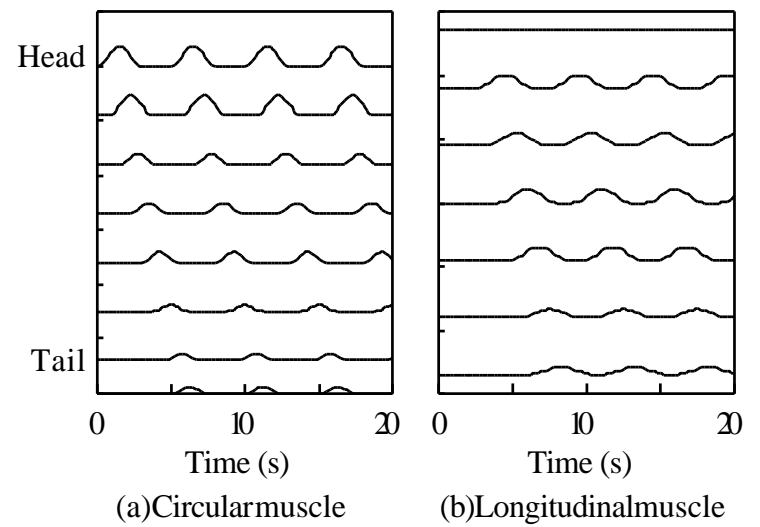


Fig. 6 Contraction pattern of muscles

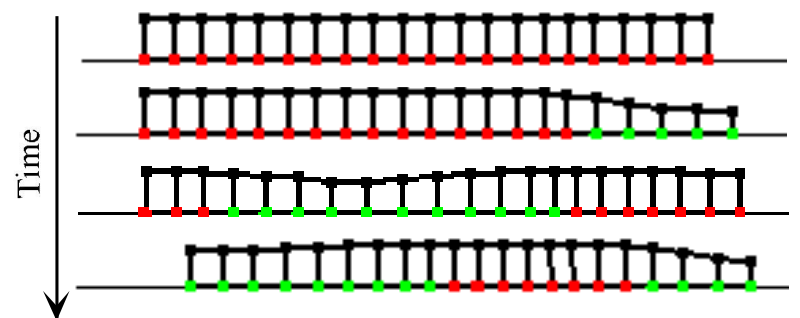


Fig. 7 Calculated movement pattern of the earthworm

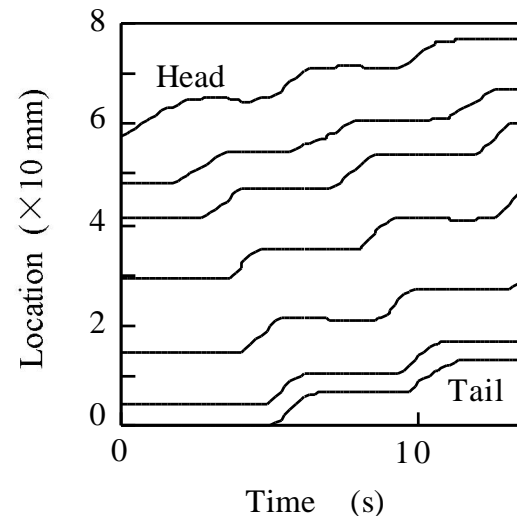


Fig. 8 Calculated locomotion pattern of flexible earthworm-like structure

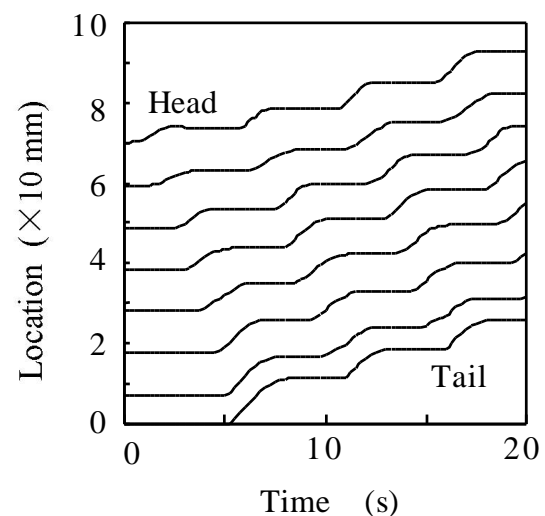


Fig. 9 Measured locomotion pattern of earthworm

ほぼ一定となることがわかった。これは、 μ_b がある値以上になると、最大静止摩擦力が増大するので、接触中の節点が後方に滑りにくくなるためである。 μ_b がある値以上ならば速度がほぼ一定に保たれたことから、感覚受容器のフィードバック系を考慮しない決定論的な筋入力を用いても、本モデルは多少の摩擦係数の変化に適応し移動し得ることがわかった。すなわち、ミミズの移動様式は摩擦係数の変化に対して適応性を持つといえる。

3.3 段差の影響 移動平面上に正弦波半波を2乗した形の小さな段差を設けて移動運動の生成を行った。段差の形状は、

$$y = \frac{1 - \cos(2\pi x/7)}{2} \quad (0 \leq x \leq 7)$$

とした。すなわち、振幅1mm、波長7mmの滑らかな段差とした。移動の様子を図11に示す。図より、全体の運動は突起にほとんど影響を受けずに移動している様子がわかる。したがって、ミミズ型移動機構は、決定論的な筋入力パターンによって、地面の多少の凹凸に適応し移動できることがわかった。なお、段差の高さがモデル直径の20%以下の場合に、平地と同様の筋収縮パターンによって移動可能であった。

3.4 部分的故障の影響 神経系の異常などの理由により、ミミズの頭部、腹部、尾部のいずれかの2

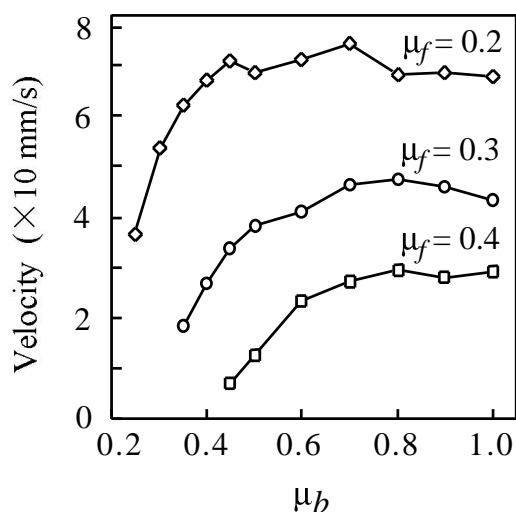


Fig. 10 Velocity-Friction coefficient curve

体節が収縮しない場合の解析を行った。その結果、一部の体節が機能しない場合にも、一定の筋収縮パターンに基づいて移動可能であった。すなわち、頭部2体節（筋全体の約12%）が機能しない場合で正常時に対する速度低下率は約12%、腹部や尾部の2体節が機能しない場合で約2%にとどまった。頭部が機能しない場合の速度低下率が大きいのは、機能しない前端の2体節が負荷として働き、全体節が伸縮運動していない期間には十分な推進力が得られないためである。

4. 考察

以下に、モデル化、計算結果、今後の課題に関する包括的な考察を行う。

4.1 モデル化について まず、モデル化に関する考察を行う。

本報では、連続体であるモデルを、伸縮リンク要素を用いて離散的にモデル化した。また、体腔液により体節の体積がほぼ一定に保たれる効果を、体節内に十字状に配した2本の線形弾性要素（補助要素）で表した。本来連続体である生物を離散化したり、流体の効果をばねで置き換えることは不自然にも思えるが、本報の目的は、生物の基本的な運動状態を求め得る最低限の力学的構成要素を準備することであるので、本モデルはこの目的を十分達成していると考えられる。

なお、本報で提案した伸縮リンク要素を用いれば、様々な形状のモデルを作成することが可能である。たとえば、伸縮可能1次元要素を三角形リンク状に組み合わせることにより、任意の2次元構造を構築することができる。この場合は線形弾性要素（補助要素）は不要となる。また、本解析は矢状面内の2次元モデルであるが、水平面内の運動をも考慮するために3次元モデルに拡張することも可能である。

4.2 解析結果について 次に、結果に関する考察を行う。本報の基本的な目的は、柔軟生物の力学構造をモデル化することである。このため、モデルの妥当性を確認するための最低限の解析を行った。まず、ミミズ

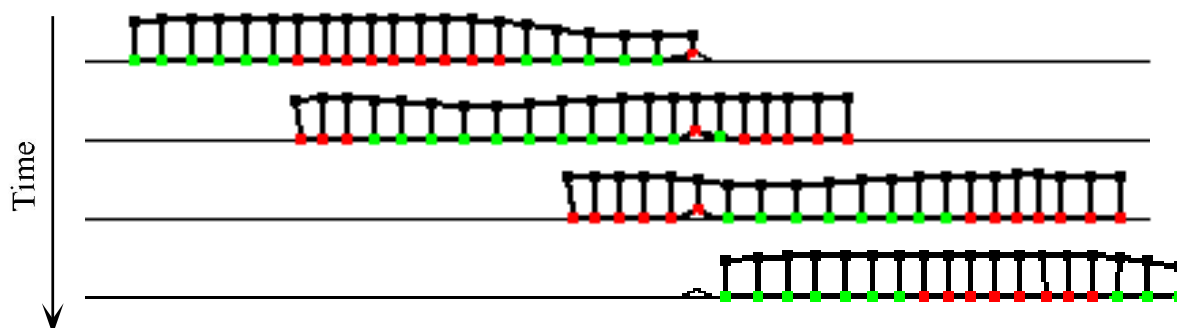


Fig. 11 Calculated movement pattern of the earthworm climbing over a projection

の筋収縮パターンと同様な筋力を各筋に与えて計算を行った結果，計測結果と同様な移動パターンを生成することができた．これより，本モデルの単純化は，ミミズのような柔軟生物の基本的な移動様式を解析するために十分であると考えられる．

次に，上の解析と同じ筋収縮パターンを各筋に入力し，環境変化の影響を調べた．すなわち，摩擦係数や対象面形状を変化させた場合の計算を行った．この結果，感覚受容器のフィードバック系を考慮しない決定論的な筋入力を用いても，本モデルは多少の摩擦係数や対象面形状の変化に適応し移動し得ることがわかった．このことは，柔軟生物の構造的冗長性が，対環境性・対故障性のために有用であることを示している．感覚受容器からのフィードバックなど，複雑な神経回路の構造の非線形性あるいは冗長さをも考慮すれば，さらに環境適応性の高い移動運動が可能であると考えられる．この点については次節で述べる．

4・3 今後の展開について 最後に，今後の課題に関する考察を行う．緒言において，ミミズなどの細長生物が力学的構造，神経系による運動制御機構および運動する環境との相互作用に基づいて移動運動を生成する機構を明らかにすることが重要であることを述べ，本報では体節の変形を考慮した構造のモデル化を行った．今後は，感覚受容器や自己受容器を考慮した神経回路による運動生成・制御機構のモデル化を行うことが必要であると考えている．以上の結果，冗長な力学系，冗長な神経系，多様な環境の相互作用に基づいて移動運動を生成するモデルが構築される．このモデルを用いれば，生物のような自律分散型システムと従来の中央管理型人工物システムとの比較を行うことによって，生物型システムの有効性を示せると考えられる．特に，生物型システムでは，筋に相当する要素の変形量が一定値に達すると

収縮運動が後方に伝播するといった単純な局所的ルールのみによって運動が生成できるのか，ミミズ，シャクトリムシ，ヘビなどの種に固有な運動形態はどのような条件下で発現し得るのか，感覚受容は生物の運動機構をどの程度ロバストにするのか，などの点を解析してゆくことができよう．また，得られた生物型システムの特徴を利用した移動ロボットを製作することによって，生物型自律分散システムを人工物に適用することの可能性と限界を明らかにすることができよう．

5. 結 論

筋収縮パターンに基づき移動運動を生成するミミズなどの柔軟細長生物の構造モデルを，各要素が収縮可能な2次元リンク機構を用いて構築した．また，本モデルを用いて数値解析を行い，ミミズ様の蠕動運動の生成が可能であることを確認した．また，ミミズは多少の摩擦係数の変化や地面の凹凸，一部の体節の故障に対し，環境適応性を備えた移動が可能であることを示した．

文 献

- (1) 広瀬，生物機械工学，(1987)，工業調査会．
- (2) 高橋，林，岩附，鈴森，黄木，みみずの運動を応用した細管内移動マイクロロボットの研究，精密工学会誌，61-593，(1995)，90-94．
- (3) 前野，山崎，立川，ミミズの運動を模倣した移動ロボット，機講論No.96-2，vol. B，(1996)，827-828．
- (4) 前野，山崎，立川，波動伝播に基づく移動機構の研究（第1報，ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション），機論62-603，C，(1996)，142-149．
- (5) R. McNeill. Alexander, Exploring Biomechanics, Animals in Motion, W.H.Freeman and Company, (1992)．
- (6) 伊藤，伊藤，生体とロボットにおける運動制御，(1991)，計測自動制御学会．
- (7) 杉，筋運動の進化，(1977)，東京大学出版会．
- (8) Zienkiewicz, O. C., マトリックス有限要素法 [改訂新版]，(1996)，科学技術出版社．