

アメンボの動作に関する研究 A Study on Motion of Paludum Japonicus

菊地 吉郎・下山田 力*

Kichiro KIKUCHI・Chikara SHIMOYAMADA

1. 諸言

アメンボは水面上を生活の場としており、不安定な水面上をバランス良く滑る¹⁾ように移動することが可能である。急加速、減速、停止および方向転換などが円滑に行われ、水面上での滑走性能が非常に優れているといえる。また、水面上を移動するという形態は昆虫の中でもアメンボ特有の移動形態であり、水面上で餌を採取するという本能的メカニズムが関係していると考えられる。アメンボのスタイルおよび移動形態は新たな水上移動手段として利用できるのではないかと考えられる。また、アメンボは水面上のみならず地上および空中をも移動可能である。これより、アメンボは生物の中でも非常に行動範囲が広く、機動性に優れているといえる。しかし、アメンボに関する文献は非常に少ない。特に、その運動メカニズムや特性に関しては明らかになっていない部分が多い。

本研究では、アメンボの水面上における滑走および地上での前進移動を中心に、動作時における脚の動かし方など、移動する際に必要な運動メカニズムや特性に的を絞り、それらを解明することを目的とする。また、他の昆虫に関する運動メカニズムのデータ^{2) 3) 4)}とも比較を行った。これらの一端を解明したので報告する。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に実験装置を示す。ハイスピードビデオカメラ（フォトロン FASTCAM-hvc-1）を用いて、水面上および地上を移動するアメンボを上方向と側面、前面、後方から撮影した。あらかじめアメンボの体長を測定しておき動画解析を行う際の基準値とする。水面上での撮影の場合は撮影を行うポイントに合わせて水の容器を交換した。地上の場合はアメンボをはっきりと確

認できるように白色の紙を敷いて行った。これは水面上の場合でも同様である。またアメンボの速度と大きさ、撮影方向に合わせて適当なレンズ、取り込み速度を決め、最も適した映像が得られるように撮影を行った。

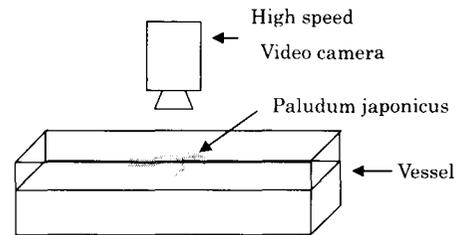


Fig.1 Experimental apparatus

3. 解析装置及び方法

3. 1 解析装置

Fig.2 に動画解析装置を示す。ハイスピードビデオカメラで撮影した映像をビデオテープレコーダーで録画し、その映像をパーソナルコンピュータの画像入力ボード（ライブラリー製ひまわり PCI）に取り込み、画像処理ソフト「Cosmos32」を用いて連続した静止画を作成し、動画解析ソフト「Move MN」と「Move Tr32」を用いて設定したターゲットの解析を行った。

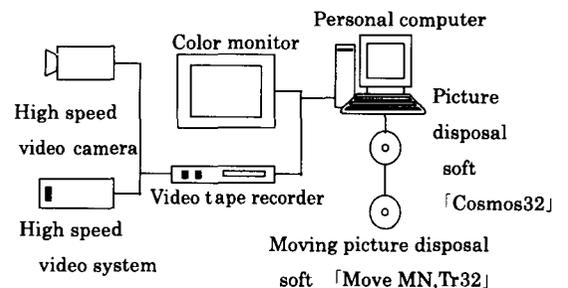


Fig.2 Analysis system

*1 平成15年度電子システム工学専攻科卒業生
(現オムロンフィールドエンジニアリング)

3. 2 解析方法

3. 2. 1 脚の動きの解析

Fig.3 に水面上でのアメンボの滑りによる脚の動きの解析の様子を示す。

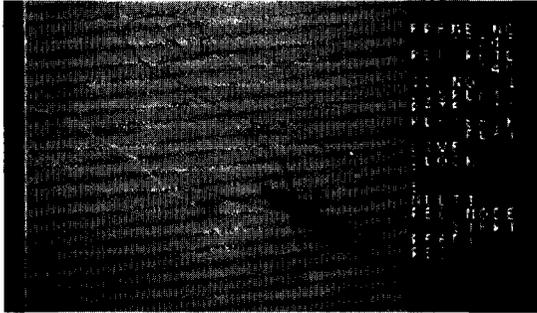


Fig.3 Analysis of the motion of paludum japonicus legs

各脚をターゲットとして動画像解析を行い、アメンボの脚の動し方および初動、移動、停止時での脚の動きを解析した。

3. 2. 2 速度の解析

Fig.4 に水面上でのアメンボの滑りによる速度解析の様子を示す。

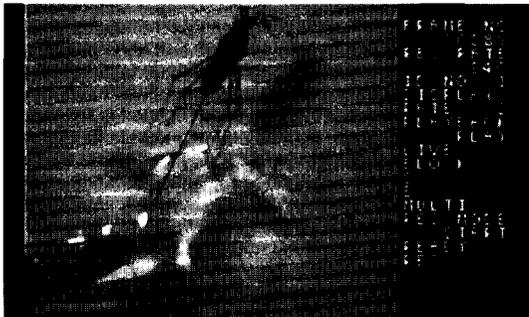


Fig.4 Analysis of moving speed of paludum japonicus

アメンボの身体をターゲットとして動画像解析を行い、解析された移動速度からその平均値を算出した。

3. 2. 3 歩幅の解析

Fig.5 に地上でのアメンボの歩行における歩幅の解析の様子を示す。

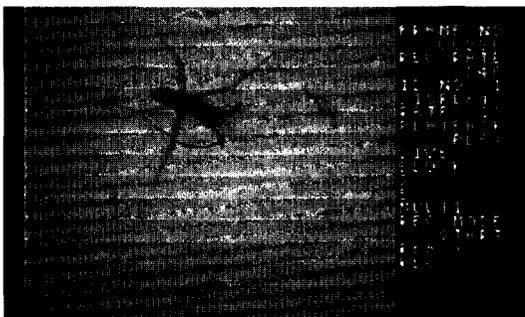


Fig.5 Analysis of footstep of paludum japonicus

水面上では中脚の先端を、地上では各脚の先端をターゲットとして動画像解析を行い、その足が移動面を離れてから接地するまでの移動距離を解析した。

3. 2. 4 周波数の解析

水面上では中脚が動き出した段階から、再び中脚が動き出すまでを、地上ではいずれかの足が移動面よりはなれた瞬間から、それ以外の足がすべて動き終わり、再び同じ足が動き出すまでを1周期として、その間のフレーム枚数と取り込み速度により周期を算出し、その値を用いて6本すべての脚の動きが1秒間にどの程度の周波数を有しているかを次式により算出した。

$$1/T \times 6 \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $T[s]$: 周期

3. 2. 5 各脚の節の角度変化の解析

Fig.6 に水面上での滑りによるアメンボの脚(第2節)の角度変化の解析の様子を示す。



Fig.6 Analysis of changing angle of second joint of paludum japonicus

各脚の第1関節(脚の付け根)、第2関節、脚先、以上の三点をターゲットとして動画像解析を行った。また、連続した静止画像も用いて、移動する際の各脚の第1節と第2節の角度変化を供試体の上方から解析した。

4. 結果及び考察

4. 1 基礎データ

Table.1 に今回の実験で用いた供試体であるアメンボの基礎データを示す。比較を行うためにTable.2 に他の昆虫の基礎データを示す¹⁾。アメンボは体長よりも長い中脚、後脚を持ち、質量が小さいことが分かる。この2つの点は水面移動を可能にさせる一つの要因であると考えられ、他の昆虫と比較した場合の一番の違いでもある。

	Paludum japonicus
Mass[g]	0.016
Length[mm]	13
Front Leg (Diameter) [mm]	10(0.138)
Middle Leg (Diameter) [mm]	19(0.078)
Back Leg (Diameter) [mm]	17(0.074)

Table.1 Basic date of paludum japonicus

	Mega crania batesii	Mantis	Cock roach	Ant	Dorcus	Rhombor rhina
Mass[g]	4.8	2.768	0.177	0.035	3.381	1.336
Length[mm]	99	88	15	11	5.9	27
Front Leg[mm]	82	56	8	11	3.2	1.8
Middle Leg[mm]	53	49	12	10	3.1	1.9
Back Leg[mm]	64	60	16	9	3	2

Table.2 Basic date of other insects

4. 2脚の動き

4. 2. 1 水面上における脚の動き

Fig.7 に水面滑走におけるアメンボの脚の動きを示す。アメンボの水面上での前進移動の形態は主に中脚を使い移動する滑りが基本となっている。今回の解析によりその前進移動の形態が2パターンあることが分かった。

第一段階の初動では、全部の脚を使い身体が安定している静止時の状態から、前脚と後脚の四本で安定をとり、それらを動かさずに2本の中脚を同時に後方へ動かし始める。第二段階で中脚を使い水面を蹴り推進力を得る。第三段階で2つの形態に分かれる。

一つは蹴った中脚と後脚を身体と平行になるようにの後方に伸ばす。この時、前脚も少し折りたたみ身体に近づける。この形態をとることにより水の抵抗を減らしていると考えられ、1ストロークで移動できる距離が増えるといえる。以降、この移動形態を滑り1として示す。

もう一つは蹴った中脚を身体の中心程度で止め、前脚と後脚はほとんど変化させない。一回のストロークでの移動量は小さい。しかし、滑り1に比べ移動速度が小さく、前脚と後脚の配置がほとんど変化せず安定性が保たれているた

めに方向を自在に変化させることができる。以降、この移動形態を滑り2として示す。

また、第1段階から第3段階までの動きを繰り返し移動を行う。水面を蹴った脚を戻す際には水面から離す場合と接水した場合に分けられる。通常は水面から脚を離して戻す。接水する場合は、水の表面張力の低下とアメンボ自身の体力の低下によるものだと考えられる。また、停止する際には全ての脚の動きを止めて接水させ、動き出す前の静止時の形態をとり減速し停止する。

以上で述べた滑りによる移動がアメンボの移動形態の主である。アメンボは不安定な水面を移動するため四点で重心を支え移動を行う。これは、アメンボの体型および接水面との関係が挙げられる。アメンボの体型は胴体部分が大きく脚は胴体に対して細く長い。このような体型を保有している場合、地上では接地面が硬く安定しているので地面と接する脚は三本あればかなりの安定度を得ることができる。しかし、水面上では自重を分散させるためと安定を得るために最低で三本以上は必要になってくると考えられる。このため、水面上でのアメンボの移動形態は前脚と後脚の四点で身体を安定させ2本の中脚を同時に動かし移動するものと考えられる。

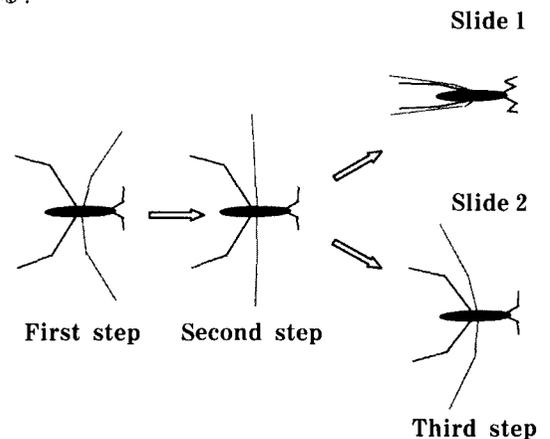


Fig.7 Motion of paludum japonicus'legs on the water

4. 2. 2 方向転換

Fig.8 に水面上での方向転換におけるアメンボの脚の動きを示す。前脚と後脚は動かさず、これらの四点で重心を支え、進む方向とは逆の中脚を動かし、もう一方は固定またはやや前方に出し行う。

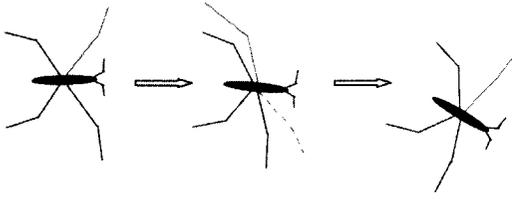


Fig.8 Motion of paludum japonicus'legs to change its direction on the water

4. 2. 3 旋回

Fig.9 に水面上での旋回におけるアメンボの脚の動きを示す。両方の中脚を前方に伸ばし、一方の中脚で水面を蹴る。これにより跳ねに近い動きになり、体が空中に上がり跳ねの反動を利用して身体を回転させる。蹴り脚でない方の脚は旋回時の反動の制御と次の行動へ素早く移行するため使われると考えられる。また、左右への方向転換の際、直角程度の方向転換を行う場合は旋回と同じ形態をとるが、空中には跳ね上がらない。アメンボは水面を蹴る力を調整して方向転換や旋回を行っていると考えられる。

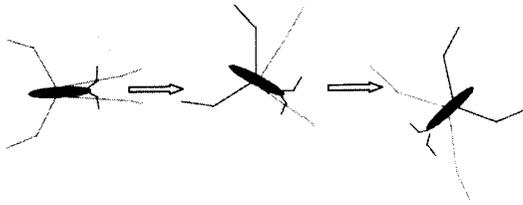


Fig.9 Motion of paludum japonicus'legs to revolve on the water

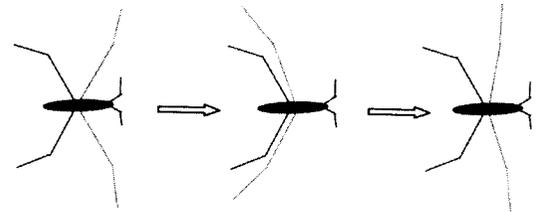
4. 2. 4 地上での脚の動き

Fig.10 に地上におけるアメンボの脚の動きを示す。地上における移動形態は以下の2つのパターンを確認することができた。パターン1では前脚と後脚を固定したままで2本の中脚を同時に動かし身体を持ち上げるような形態で移動を行う。これは水面上を移動する滑りに近い形態であるといえる。この動きは他の昆虫のデータ^{*)}にはなかった形態であり、アメンボ特有の動きであると考えられる。

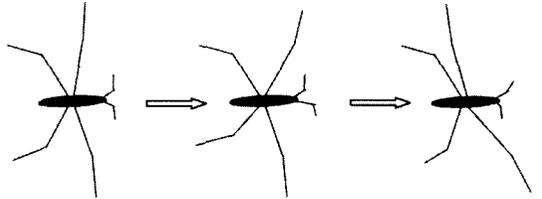
パターン2ではそれぞれの脚の動きには規則性がない。前後の隣り合った脚も同時に動く。

これは他の昆虫の脚の動き^{*)}にはなかったものである。また、わずかではあるが交互三脚歩行^{*)}に近い動きも確認できた。

地上での歩行による移動形態を2つに分けたが、この2つのパターンを織り交ぜながら移動しており、パターン2の方が歩行における移動形態の大半を占める。



Pattern 1



Pattern 2

Fig.10 Motion of paludum japonicus'legs on the ground

4. 2. 5 跳ねによる脚の動き

Fig.11 にアメンボの跳ねによる脚の動きを示す。この脚の動きは地上、水面上どちらでも行われる。跳ねは側面から撮影した映像より身体が斜め前方に跳ね上がることから、中脚の角度変化によって行っていると考えられる。

地上で最も多い移動形態は歩行ではなく跳ねによるものである。跳ねは地上におけるパターン1の脚の動きと同じだが、中脚の角度を変化させて地面を強く蹴っていると考えられ、この点が異なる。しかし、この移動形態は地上、水面上共に方向性が不安定である。これは地上では接地面を確実に捉えられず滑っており、水面上では水面を深く蹴りこむために接している水面が揺らぎ不安定な状態になり、アメンボがその影響を受けるためだと考えられる。この跳ねによる脚の動きは、アメンボの基本的な移動形態である滑りによる脚の動きに関係しているといえる。この動きが変化したものが跳ねであり、地上と水面上の両方で取り得る移動形態である。

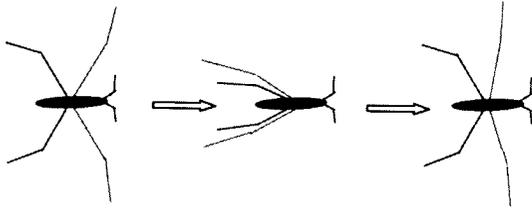


Fig.11 Mothin of paludum japonicus'legs when jumping

4. 3 速度

Fig.12 にアメンボの前進移動における平均速度を示す。移動形態、脚の動きの違いにより速度も変化する。滑りにおける移動速度の違いは、地上におけるゴキブリや蟻と同様に、歩行と走行の違いと置き換えて考えることができる⁴⁾。

跳ねの移動速度は地上および水面上とも近い値を示した。これは、跳ねでの移動形態は地上、水面上の両方で同じ形態をとることと、Table.1 からも分かるようにアメンボの質量が極端に軽いため、地上の場合での跳ね時に受ける接地面からの反発力を水面上でも受けられるためだと考えられる。滑りおよび跳ねのように中脚を中心とした規則性のある移動形態をとる時の移動速度は速い。しかし、地上での歩行による移動速度では他の移動形態に比べ遅いことが解る。これは移動形態に規則性がないためだと考えられる。

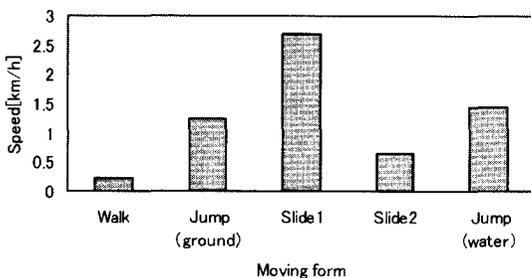


Fig.12 Moving speed of paludum japonicus

Fig.13 に他の昆虫の前進移動における平均速度を示す⁴⁾。地上において昆虫の中で速いとされるゴキブリと比較しても、水面上での滑り 1 の移動形態を示す時のアメンボの移動速度は、ゴキブリの 2 倍以上となっていることが確認できる。これは水面上では接している面から受ける抵抗やその性質の違いによるものだと考える。

また、地上での跳ねはゴキブリと同等な速度を示しているが、歩行に関してはかなり遅く、アメンボの歩行には規則性がないためだと考えられる。水面上においてのアメンボの滑りという移動形態は、ゴキブリやアリの持つ交互三脚歩行のように高速移動に適した非常に速い移動形態であるといえる。

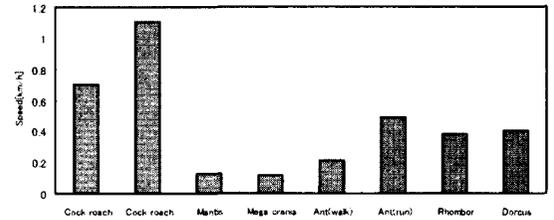


Fig.13 Moving speed of other insects

次に解析により得られた速度と過去のデータ⁴⁾を用いて、アメンボは体長に比べどの程度の速度で前進移動を行っているのかを人間（スプリンター、身長 180[cm]）の身長を基準とし、この速度 3.6 [km/h] を 1 として他の生物との速度の比較を行った。その結果を Fig.14 に示す。これより、体長が同等であると仮定した場合、地上でのアメンボの速度は人間とほぼ同等であり、滑り 1 の形態をとる時はチーターよりも速いゴキブリより 3 倍以上も速いことが分かる。

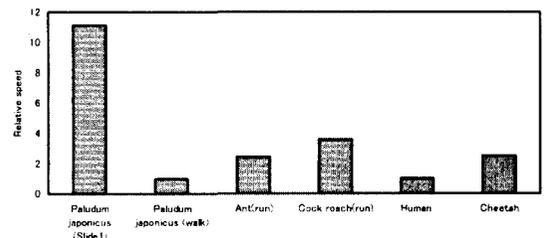


Fig.14 Relative speed (Human 1)

4. 4 歩幅

本稿で示すアメンボの歩幅について定義をしておく。水面上での滑りにおいては中脚が動き出してから接水するまでの 1 ストローク、跳ねも同様に中脚が動き出してから接水、接地するまでの一跳ね、歩行ではある脚が移動面を離れてから接地するまでに移動した距離を歩幅と定義する。Fig.15 にアメンボの前進移動における平均歩幅を示す。アメンボは移動形態の違いにより歩幅が異なることが分かった。

地上における歩行と跳ね、水面上における滑

り2と跳ねの歩幅を比較すると、水面上での歩幅の方が多少大きい。また、滑り1に関しては歩行に対して5倍以上大きい。地上での歩幅に比べ水面上での歩幅が大きくなる理由は、水面は抵抗が小さいために慣性力が働き滑りで移動している距離の差が現れているのだと考えられる。また、滑り1においては、水面上の場合は脚で接する面を多く捉え蹴ることができ、水面から受ける反発力を利用できるためではないかと考えられる。アメンボにとって水面は抵抗が小さいために移動範囲を広げることができ、また、高速に移動できる要因の一つだと考えられる。

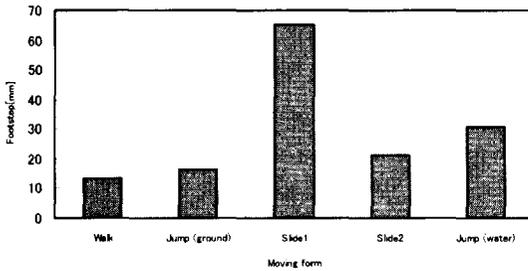


Fig.15 Footstep of paludum japonicus

Fig.16 に示す他の昆虫の歩幅⁹⁾との比較を行う。体長や速度などを踏まえてみるとアメンボの地上での歩行、跳ねの歩幅はゴキブリやアリと近い値を示しているが、水面上での値は大きく異なる。これも接地面の違いによるものだといえる。アメンボは接地面の違いを正確に捉えることができるセンサーを持ち、状況に合わせて効率良く移動を行っているのだと考えられる。

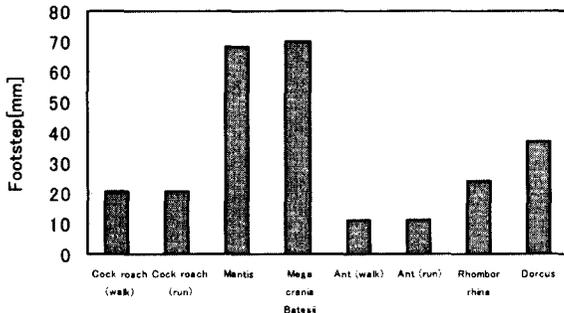


Fig.16 Footstep of other insects

4. 5 周波数

Fig.17 にアメンボの前進移動における平均の周波数を示す。滑り1や水面上における跳ねが

最も高い周波数の値を示している。この結果と4.3の Fig.12 の速度値と比例しており、周波数が上がると伴に速度が上がっていることが分かる。

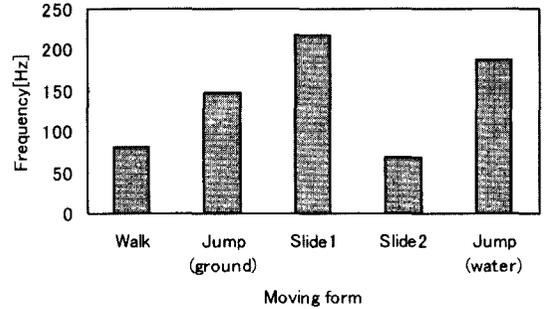


Fig.17 Frequency of paludum japonicus

Fig.18 に示す他の昆虫の周波数との比較を行う⁹⁾。アメンボの周波数は全体的に高いことが分かる。また、アメンボの滑りによる周波数の違いは高速移動を行うゴキブリやアリの歩行と走行の周波数値と同様の变化を示している。しかし、ゴキブリやアリは高速移動を行える一つの要因として歩幅は変えずに周波数を上げて行っている⁴⁾と考えられているが、アメンボは歩幅と周波数の2つを変化させ高速移動を行っている⁴⁾と考えることができる。また、この違いが他の2匹の昆虫との大きく異なる点であるといえる。

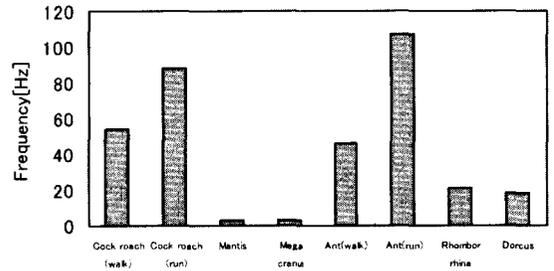


Fig.18 Frequency of other insects

4. 6 各脚の節の角度変化

Table.3, Table.4 にアメンボの各脚の第1節および第2節の角度変化を、Table.5 には第1節と第2節の角度変化の差を示す。全体的に中脚の角度が最も変化していることが分かる。これは、アメンボの移動形態は中脚の動きを主としているからだといえる。滑り1では全部の脚の角度が大きく変化しており、第1節と第2節の角度

変化により前進していると考えられる。滑り1において前進移動に最も大きく影響している脚は水面を蹴っている中脚である。後脚も水面を漕いで推進力を与えていると思われるが、基本的には前脚と後脚は水から受ける抵抗を減らすために変化しているものと考えられる。また、アメンボは蹴った中脚を戻す際に脚を折りたたみ接水時に再び脚を伸ばす。このことが第2節の角度に現れていると考えられる。以上より、アメンボは中脚を伸ばし水面を大きく掻くことで推進力をより多く稼いでいると考えられる。水面上とは対称的に地上での歩行は Table.3, Table.4 より前脚を大きく使い全身を引っ張るようにして移動を行っていると考えられる。また、前脚と中脚の角度変化の差が大きく現れており、第2節の角度変化が前進移動に影響していると考えられる。跳ねにおいては地上、水面上とも中脚の角度変化の差が現れており第2節の角度変化が前進移動に影響していると考えられる。アメンボの脚の動きの特徴として、関節を伸ばし、より遠くで接地面を蹴り移動を行っていると考えられる。

	Slide1	Slide2	Jump (water)	Walk	Jump (ground)
Front Leg[°]	20	0	15	102	30
Middle Leg[°]	112	106	110	105	98
Back Leg[°]	27	0	25	30	35

Table.3 Angle change of first joint

	Slide1	Slide2	Jump (water)	Walk	Jump (ground)
Front Leg[°]	72	0	52	138	35
Middle Leg[°]	132	1	92	67	68
Back Leg[°]	52	5	32	30	33

Table.4 Angle change of second joint

	Slide1	Slide2	Jump (water)	Walk	Jump (ground)
Front Leg[°]	52	0	0	36	5
Middle Leg[°]	22	4	18	48	30
Back Leg[°]	25	5	7	0	2

Table.5 Difference between the angles

5. 結言

本研究の範囲内で次のことが分かった。

- ・ アメンボの移動形態は中脚を主に使い行われ、他の四本の脚で重心を支え2本の中脚を同時に後方へ動かし前進移動を行っている。
- ・ アメンボが水面上を移動する際の基本形態である滑りには2つあることが確認できた。一つは中脚を後方に伸ばしきる滑り1、もう一方は中脚を中心程度で止める滑り2である。
- ・ 水面上での方向転換および旋回による中脚の動きはそれぞれを別々に使い行われており、滑りの脚の動きとは異なる。
- ・ 跳ねによる移動は水面上と地上の両方で行われている。また、跳ねによる脚の動きは滑りの形態が変化したものであり、接する面を蹴る中脚の角度を変化させて行っている。
- ・ 地上における歩行では中脚を同時に動かす形態、ゴキブリやアリの持つ交互三脚歩行のような形態、および隣り合った脚が同時に動く形態が見うけられたが全体を通しての規則性は認められなかった。
- ・ アメンボの滑りという移動形態は、ゴキブリやアリの持つ交互三脚歩行のように高速移動に適した非常に速い移動形態であるといえる。
- ・ 移動形態の違いにより速度も変化し、滑り1と滑り2における速度の違いは歩幅と周波数の変化に依存する。
- ・ アメンボの前進移動は中脚を主として行われており、その第1節および第2節の角度変化が前進移動に大きく影響している。
- ・ 地上での歩行は前脚を大きく使い全身を引っ張るようにして移動を行っている。また、前脚と中脚の角度変化の差が大きく現れており、第2節の角度変化が前進移動に影響していると考えられる。
- ・ アメンボが高速で前進移動できる理由の一端として次のことが挙げられる。
 - (1) 滑りという水面上で円滑な移動を可能にできる移動形態を保有している。
 - (2) 脚の歩幅が大きく周波数も非常に高い。
 - (3) 関節を伸ばし、より遠くで接する面を蹴

り移動を行っている。また、滑りという規則性のある単純な足の動きを繰り返す行うことにより前進移動をしている。

参考文献

- 1) 川下・矢野, “水生昆虫の動作解析”, 機構研論文 (2000)
- 2) 加藤・菊池, “昆虫の足の動きに関する研究 (第一報 接地率の比較)”, 機構論集, No.010-2, (2001), 205
- 3) 加藤・菊池, “昆虫の足の動きに関する研究 (第二報 各脚の角度変化の比較)”, 関東学生会第41回講演集, (2002), 349
- 4) 加藤・菊池, “昆虫の足の動きに関する研究”, 小山高専研究紀要, 第35号, (平成15年), 57

〔受理年月日 2003年9月30日〕