

原生動物ゾウリムシの遊泳行動と重力

黒谷(和泉)明美*・大矢真弓**・最上 善広**
山下 雅道*・奥野 誠***・馬場 昭次**
*宇宙研・**お茶大・理・***東大・教養

Swimming Behaviors of *Paramecium* under
Various Gravitational Environments

By

Akemi IZUMI-KUROTANI, Mayumi OOYA, Yoshihiro MOGAMI,
Masamichi YAMASHITA, Makoto OKUNO and Shoji A. BABA

Abstract : Negative geotaxis of ciliates is a biological effect of gravity at cellular level. Swimming behaviors of the ciliate *Paramecium* were investigated under various gravitational environments (1G, low-gravity, and hyper-gravity). Two methods were adopted to describe swimming behavior ;

1. observation of two-dimensionally constrained behaviour using a thin chamber.
2. observation of natural three-dimensional swimming behavior using a cubic chamber. It makes possible to avoid effects of mechanical stimuli given by walls.

Paramecium cells seem to regulate their swimming velocity in response to the angle between swimming direction and gravity vector.

* 宇宙科学研究所

** お茶の水大学理学部

*** 東京大学教養学部

概 要

重力が細胞活性に果たしている役割を見出すために異なる重力条件下でのゾウリムシの遊泳行動を観察、記録、解析した。ゾウリムシは1G下で遊泳槽の上方に集まるという負の走地性をしめすことが知られている。我々はゾウリムシを厚さの薄いチャンバーに入れて遊泳の自由度をできるだけ2次元に規制する方法と3次元的に自由に遊泳する像を2つの2次元像に分解する方法とによって解析可能な遊泳像を記録した。後者の方法はチャンバーの側壁による機械的な刺激がゾウリムシの行動に及ぼす影響を排除し得るという点からより有効な手段といえる。この2つの方法を用いることによってゾウリムシは負の走地性を明かにしめす様な条件下では遊泳方向にしたがって遊泳速度を調節できることを示唆するなどの結果が得られた。

重要語：ゾウリムシ・負の走地性・3次元の遊泳行動・機械的刺激

1. 序 論

生命現象は周囲の環境との関わりの中で営まれる。地球上の生物は、その誕生から数十億年に渡ってさまざまな地球環境と関わりを持ちながら生物圏の環境を生み出し、その環境に適応し、進化し続けてきている。重力は地球上の生物に普遍的に働き続けてきている環境要素の一つであり、さまざまな影響を生物に与えている。生命現象における重力の役割とその機構を解明することは生物学にとって大きな課題の一つである。

古くから単細胞動物である原生動物が沈降するのに逆らって重力の方向とは逆の方向に向かおうとする重力走性（走地性、この場合は上方に向かうため負の走地性という）は知られているが[1, 2]、これまで一般に細胞や細胞小器官のようなマイクロなレベルでの重力の影響は重力の一次的な作用が質量に対して与えられるため、それほど大きくないものと考えられてきた。しかし宇宙における生物学実験が進むうちに、細胞の増殖速度や免疫活性の変化など細胞のレベルで[3, 4]、さらには遺伝子の修復過程などの細胞以下のレベルにおいても[5]重力の影響が無視できないものであることがわかってきた。

細胞を含めた生物のさまざまな生命現象における重力の影響を調べるためには、1Gとは異なる重力環境を利用した実験が有効な手段となる。我々は数年前から1G環境および気球、落下塔からの自由落下により生成される微小重力環境、さらに遠心機による過重力環境でのウニのプルテウス幼生や原生動物である繊毛虫ゾウリムシの遊泳行動を観察、記録、解析することを目的とした実験を行ってきた[6-12]。プルテウス幼生は重力による沈下を補償するように遊泳速度を調節し得ることが明らかになっている[10]。

単細胞動物の繊毛虫ゾウリムシは、淡水中に棲み、体全体に生えた繊毛を動かし周囲の水を推すことによって推進力を得ている。1回の繊毛打は、推進に有効な力を得るために繊毛をほぼまっすぐにしたまま打つ有効打と水の抵抗をできるだけ少なくするように根元

につくられた屈曲を伝播させながら戻る回復打からなる(図1)。有効打の方向は体のま後ろの方向から少しずれているため、ゾウリムシは3次元的ならせんを描きながら泳ぐ。有効打の体軸に対する方向が変化するとこのらせんの半径とピッチが変化する。遊泳の様子は、半径がピッチと比べて小さいほとんど直線的な遊泳から半径がピッチに対して大きくほとんど円運動を示すような遊泳まで変わり得る(図2)。さらに機械的刺激、化学的刺激、温度刺激、あるいは電気的刺激などは細胞膜でのカルシウム依存性の活動電位の発生を介して有効打の逆転を起こし(繊毛逆転反応)、遊泳方向の変換を生じさせる(逃避行動)。ゾウリムシについては細胞における環境要素の感受から信号処理および遊泳行動の制御にいたる機構に関する知識が集積されており、ゾウリムシの遊泳行動を解析することにより細胞内の変化を推測することができる。秩序だった繊毛打や、単一の繊毛の動きがどのようにして制御されているのか、その生化学的な機構の解明も進んでいる[13]。重力が細胞レベルにおいてどのように作用をおよぼすのか、重力受容器が細胞内に存在するのかといった問題を解明するのに、単細胞のゾウリムシの遊泳行動を様々な重力環境において観察・解析することは意義の深いものである。

ところで、ゾウリムシは前述したようにいくつかの特徴ある遊泳行動を示し、かつその行動は3次元的なものである。その行動を観察するために2つの方法を用いた。一つは、厚さの薄いチャンバーに入れて遊泳の自由度をできるだけ2次元に規制する方法である。もう一つは、3次元的に自由に遊泳する像を2つの2次元像に分解する方法である。重力環境条件は、大気球および落下塔を用い1Gから自由落下開始後0Gに遷移する状態、自由落下中の0G、および遠心機により1-5Gを印加した状態を比較した。

ここでは現在までに明かとなったさまざまな重力環境下でのゾウリムシの遊泳行動につ

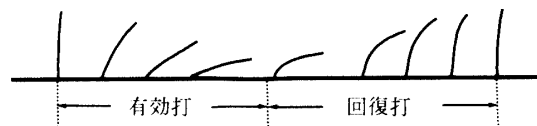


図1 繊毛打の模式図

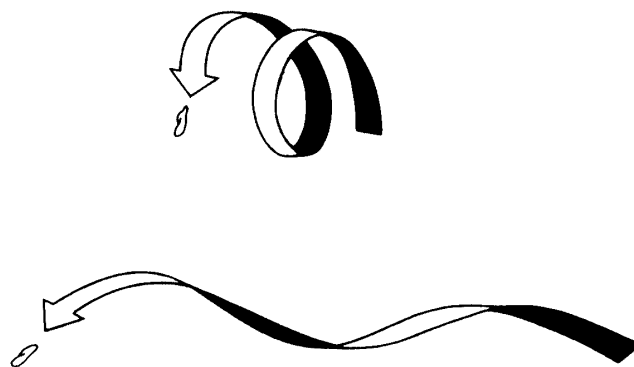


図2 ゾウリムシの遊泳パターン

いてまとめて報告する。

2. 2次元内に遊泳行動を規制した実験

2.1 材料と方法

ゾウリムシ

ゾウリムシ (*Paramecium caudatum*) は、牧草の煮汁中でビール酵母をえさとして 24°C で培養した。増殖安定期に入った細胞を集め、実験液 (Dryl 氏液: 2 mM クエン酸ナトリウム・2 mM リン酸緩衝液 (pH 7.0)・1.5 mM CaCl₂, または 4 mM KCl・1 mM CaCl₂・1 mM Tris 緩衝液 (pH 7.2-7.4)) で洗った。実験液に懸濁したゾウリムシは、内径約 1~2 cm 角、厚さ 1 mm で遊泳の自由度をできるだけ 2次元に規制できるようにしたチャンバーに入れた。

1 G での実験

ゾウリムシを入れたチャンバーを鉛直にたて、鉛直面内での遊泳行動を観察した。行動は暗視野多重露光写真により連続照明で全体の軌跡を、一定間隔のキセノンフラッシュで瞬間の位置を記録した。位置をデジタイザーでコンピュータに入力し、遊泳方向と遊泳速度を求めた。

低重力下での実験

大気球による S-520 ロケット回収実験において、回収体の空きスペースにゾウリムシ観察装置を搭載した。回収体の曝露部に与圧容器に収納された遊泳チャンバーおよび映像取得のためのビデオカメラ、この実験部を周期的に回転し自由落下前に定位置に保持する機構、これらの動作を制御する CPU 回路を収めた。回収体与圧計器室内には遊泳画像と音声信号に変換された遊泳チャンバーの温度やコマンド受信内容を収録する VTR およびその動作の制御およびコマンドの受信を行う CPU 回路を収納した。気球のテレメトリにより、気球がレベルフライトに入った後、落下およそ 30 分前に録画開始など実験操作を開始するコマンドを地上から送信し、VTR が録画状態に遷移したことを示すアンサを受信した。回収体の気球からの切り離し 10 秒前にもコマンドが生物実験系に与えられ、装置の動作確認を行い自由落下時の状態へと遷移させた。遊泳チャンバーの周囲には凝固温度のわかっているパラフィン油を配置し、受動的な温度調節を行った。実験前夜から回収体曝露部に温度制御した送風を行って、装置をパラフィン油の融解温度以上に保った。放球日の早朝、チャンバーを収めた与圧容器の外部からゾウリムシを含む液を注入した。

1987 年 5 月に行われた実験では、回収体の回収には成功し遊泳画像などの記録を得ることができた。しかし、記録系のスタート以前に遊泳チャンバー中に気泡が混入ないし発生したため、自由落下中に観察できたゾウリムシの個体数が少なく良好なデータを取得できなかった。回収後装置から取り出されたゾウリムシは十分な遊泳活性を保持しており、装置の有用性は確かめられた。

大気球実験に比べると微小重力状態の持続時間が単秒時に限られる地上での落下実験ではあるが、多数の実験データを集積することを目的として落下塔による実験を行った。自由落下体を宇宙科学研究所の高さ 35 m の落下塔より落下させることにより、約 2 秒間の 0.02 G 以下の低重力状態を得ることができる。用いた遊泳行動記録用の光学系の概略を図 3 にしめす。記録用のチャンバーは LED によって偏斜照明され、暗視野照明下での遊泳行動をテレビカメラでとらえ、VTR に記録した。自由落下の間の落下体の軸方向の加速度を歪ゲージ式センサーにより検知し、CPU 回路でモデム信号に変換したうえ VTR の音声トラックに記録した。ビデオ記録に対して各フレームごとに重力加速度の値を対応させた後、遊泳の軌跡をトレースし、1 G の場合と同様に解析した。

過重力での実験

低重力下での実験に用いた遊泳記録用装置を宇宙科学研究所のアーム長 2 m の遠心機に搭載して 5 G までの過重力状態での遊泳行動を記録した。解析は低重力下での実験と同様に行った。

遊泳行動解析のための理論式

ゾウリムシは体表の多くの繊毛を秩序をもって動かし推進力を得ている。この推進力は、単一の繊毛の運動と周囲の液の粘性抵抗により生み出される推進力を全ての繊毛についてベクトル和したものである。ゾウリムシの運動は、細胞体が周囲の液から受ける粘性力、細胞体の密度が液の密度より大きいことからする沈降力、および繊毛の運動による推進力

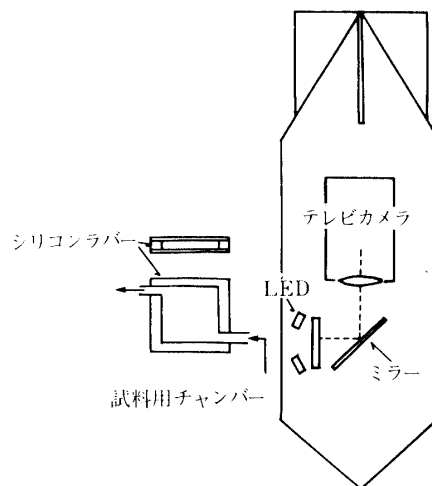


図 3 落下体内部に組み込まれた行動記録用の光学系

遊泳行動記録用のチャンバーは厚さ約 0.3 mm のカバーガラスと 1 mm のシリコンゴムのスペーサーからできており、スペーサーの一部に開けた出入口を通してサンプルを注入するようになっている。チャンバーは LED によって偏斜照明される。

によって決まる。繊毛の運動のない場合には、ゾウリムシは沈降するが、その沈下速度 s は、細胞体の受ける粘性力と沈降力のつりあいから決まる。一方重力がないとすると、推進速度は粘性力と推進力に支配される。かりに、ゾウリムシが重力環境を感知せずに自由遊泳しているとすると、遊泳速度ベクトルは図4に示めされるように推進速度ベクトルと沈下速度ベクトルのベクトル和とすることができる。遊泳方向を θ とすれば、遊泳速度の絶対値 v は(1)式で表せる。

$$p^2 = v^2 + s^2 - 2vs \cos \theta$$

$$v = \sqrt{(p^2 - s^2 \sin^2 \theta)} + s \cos \theta \quad (1)$$

v : 遊泳速度

p : 推進速度

s : 沈下速度

θ : 遊泳方向

実際に測定されるのは遊泳速度： v と遊泳方向： θ である。この遊泳速度の遊泳方向に対する依存性と(1)式から求められるそれを比較することによって遊泳行動が物理的な要因のみによって支配されているのかどうかを調べることができる。(1)式から重力を感知していないと仮定した遊泳速度の理論曲線を求めるにあたって、 p には測定された 0° (鉛直下向き)と 180° (鉛直上向き)方向の速度の平均を、また s には NiCl_2 (5 mM)で繊毛運動を停止させたゾウリムシの沈下速度をあてはめて計算した。

上の解析は、ゾウリムシが重力ベクトルと体軸のなす角にしたがって遊泳速度、言い換えれば推進力を調節しているか、あるいは遊泳速度を検知してこれを調節しているかにつ

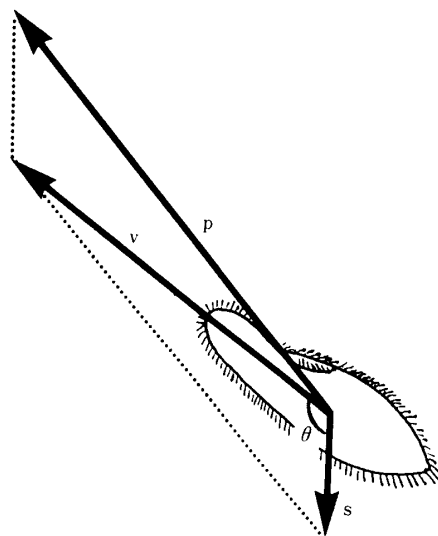


図4 ゾウリムシの遊泳速度ベクトルなどの定義

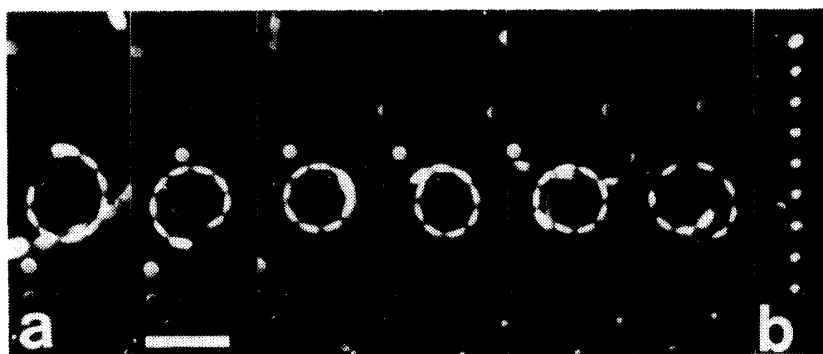
いて調べるものである。重力走性という性質は、このような遊泳速度の調節ばかりでなく、遊泳方向の統計的分布によっても出現するものである。ゾウリムシは前端部に力学的刺激が与えられると繊毛の逆転打による後退行動を起こしたり、また自由遊泳中にも自発的に遊泳方向を変化させる。下方に遊泳している時に遊泳方向の変化する確率が多かったり、あるいは遊泳方向を変化させるときに上向きに変化させる確率が多かったりしても負の走地性は発現する。したがって、遊泳速度の方向依存性ばかりでなく、このような性質についても詳しく観察し解析する必要がある。

2.2 結果と考察

1G下での実験

厚さ1mmのチャンバー内では、はじめは直線的に泳ぐ細胞が多く、次第に曲線を描いて泳ぐものが増加し、定常的な円運動を示す細胞が現れてきた。図5に示されるように定常的な円運動をしている場合は円運動の中心の垂直位置をほとんど変えなかった(a)。このときの垂直位置変化速度は沈下速度に比べて有意に小さかった。

チャンバーに入れて3時間静置した後に直線的な(曲率0.1/mm未満)遊泳をしたゾウリムシ(図6(a))及び円運動を示した(曲率0.85/mm以上)ゾウリムシ(図6(b))の実際の遊泳速度(各点)と前述の計算で求めた遊泳速度(点線)を比較すると少なくとも円運動を示しているゾウリムシでは遊泳速度は理論曲線から離れ、どの方向にもほぼ一定の速度で泳いでいることがわかる。これはゾウリムシが何らかの方法によって重力方向と遊泳方向の相対関係に従って遊泳のための推進力を調節するか、遊泳速度自体を検知して遊泳速度を一定に保つよう調節するかして、重力による沈下を補正し得ることをしめしている。



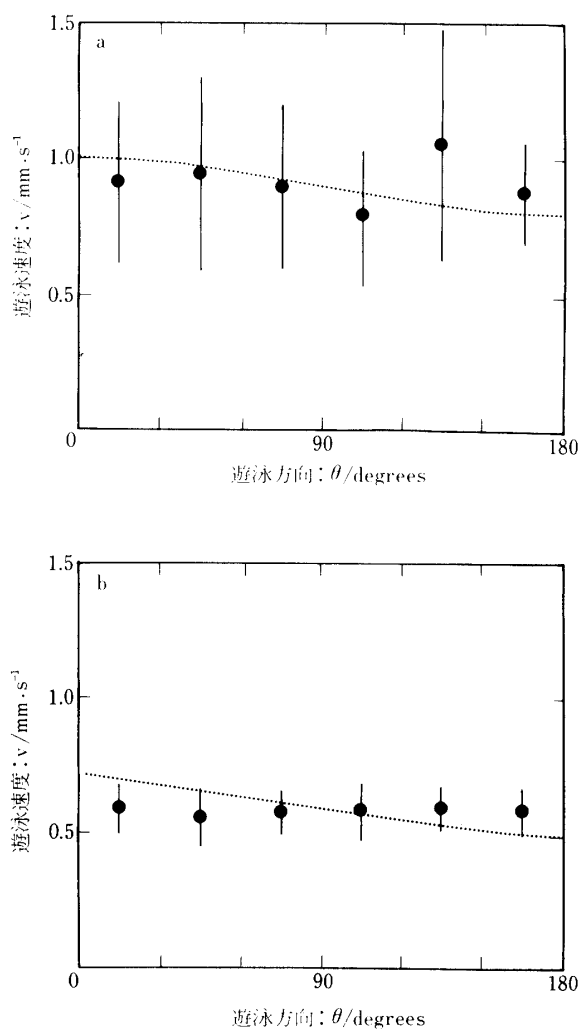
フラッシュ間隔は0.5秒(a)と4秒(b)。各コマの最初のフラッシュが最も明るい。(a)には、コマ間に約1秒のロスタイムがあるので、(a)も(b)も全体では約30秒がしめされている。スケールバーは1mm。

図5 ゾウリムシの鉛直面内での円運動(a)と繊毛運動停止による沈下(b)

低重力下での実験

図9は、低重力下での実験結果である。(a)：曲率0.1/mm未満、(b)：曲率0.85/mm以上の軌跡で遊泳した細胞の遊泳速度と遊泳方向の関係を表している。1回の実験から得られるデータ数が少ないため、実測値と理論曲線が一致しているかどうか結論をくださるには今後のデータの蓄積が待たれている。

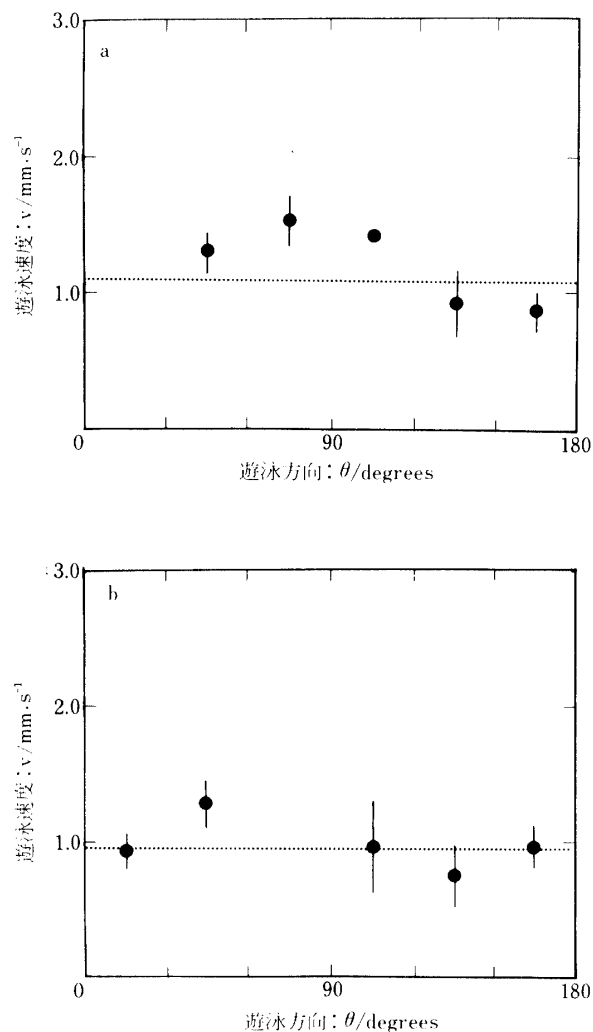
図8は低重力下でのゾウリムシの遊泳軌跡の例である。黒丸は1Gでの白丸は低重力下での軌跡をしめしている。(各点の時間間隔：0.33 sec.)軌跡に沿った矢印は遊泳方向をしめす。この図にしめされるように低重力に遷移する際に鉛直上向きに泳いでいた細胞については低重力に遷移後、遊泳速度の減少する傾向が見られた。



(a)遊泳の軌跡の曲率が0.10/mm未満の場合、(b)遊泳の軌跡の曲率が0.85/mm以上の場合。点線は重力を感知しないと仮定したときの遊泳速度の方向依存性についての理論曲線。各点は実測値である。

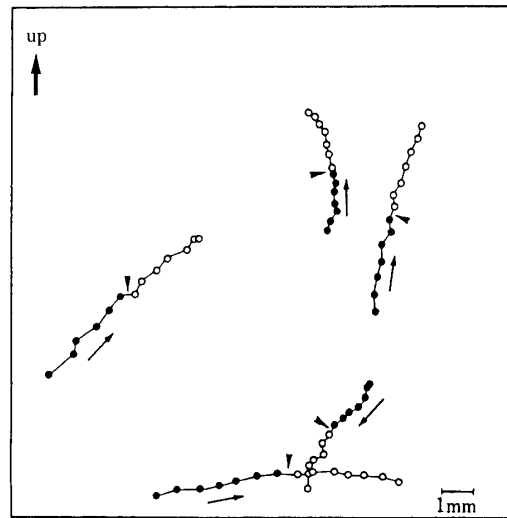
図6 1G下における遊泳方向と遊泳速度の関係

また図8から、重力の急変があつたにもかかわらず、ゾウリムシは遊泳方向を大きく変えることはなかつた。このことは自由落下によって得られた急激な重力加速度の減少とそれに引き続く約2秒間の低重力環境では逃避行動が引き起こされなかつたことをしめしている。逃避行動のひきがねとなる繊毛逆転反応は繊毛膜を介してのカルシウム依存性の活動電位によって誘発される[14]。本研究における観察では、低重力条件下でこれらの一連の反応は誘発されなかつたことになる。



(a) 遊泳の軌跡の曲率が $0.10/\text{mm}$ 未満の場合、(b) 遊泳の軌跡の曲率が $0.85/\text{mm}$ 以上の場合。点線は重力を感知しないと仮定したときの遊泳速度の方向依存性についての理論曲線。各点は実測値である。

図7 低重力下における遊泳方向と遊泳速度の関係



黒丸は1Gでの、白丸は低重力下での軌跡を表す。各点の時間間隔は0.33秒。矢尻は重力加速度の変化時を、軌跡に沿った矢印は遊泳方向を表す。図の上方が鉛直上方をしめしている。

図8 鉛直面内に置かれたチャンバー内でのゾウリムシの遊泳軌跡のトレース

過重力下での実験

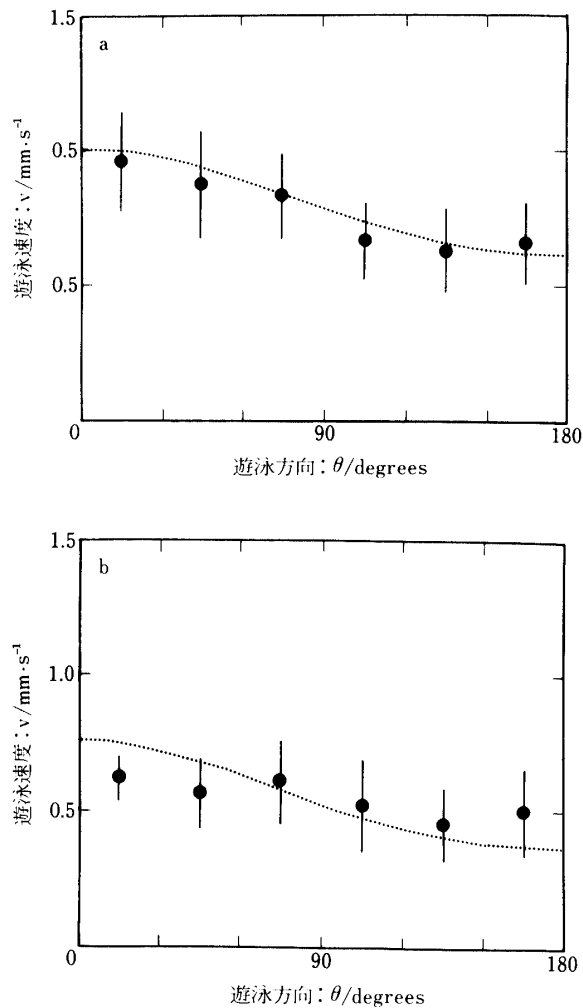
図9は、過重力(2G)下での実験結果である。(a)：曲率0.1/mm未満、(b)：曲率0.85/mm以上の軌跡で遊泳した細胞の遊泳速度と遊泳方向の関係を表している。2G下での沈降速度は1G下での沈降速度の2倍の値を用いて、重力を感知しないと仮定したときの遊泳速度の遊泳方向依存性についての理論曲線を求めた。1Gの結果と同様にまっすぐな軌跡をしめす細胞では実測された遊泳速度は理論曲線にのり、曲率の大きな軌跡を示すような細胞では理論曲線とは一致しないことが明らかになった。つまり、曲率0.85/mm以上の円弧を描いて遊泳している細胞は、重力の方向に対して遊泳のための推進力を調節するか、遊泳速度を一定に保ち得ることがしめされた。

以上にしめされた直線的に泳いでいるゾウリムシと円弧を描いて泳ぐゾウリムシの遊泳行動の違いは何によるものであろうか。直線的に泳いでいるゾウリムシはすでに最大活性の状態にあり、遊泳速度の調節が不可能であるのに対して、円弧を描いているゾウリムシは最大活性に達しておらず、遊泳速度の調節も可能であることが考えられる。実際、平均遊泳速度は円弧を描いて泳ぐゾウリムシの方が小さくなっている。

3. 3次元自由遊泳行動の記録

3.0 目的

ゾウリムシは機械的な刺激に敏感に反応することが知られている。細胞の前端部に機械



(a) 遊泳の軌跡の曲率が $0.10/\text{mm}$ 未満の場合, (b) 遊泳の軌跡の曲率が $0.85/\text{mm}$ 以上の場合. 点線は重力を感知しないと仮定したときの遊泳速度の方向依存性についての理論曲線. 各点は実測値である.

図 9 2G 下における遊泳方向と遊泳速度の関係

的な刺激を与えると繊毛膜上で脱分極が起こり, それに引き続いてカルシウムイオンの細胞内への流入による繊毛打の逆転が起こり, ゾウリムシは後退遊泳する. この繊毛打逆転反応が, ゾウリムシの重力走性に密接な関わりを持つことは, ゾウリムシの繊毛打逆転反応を起こさない突然変異株は, 野生株が負の走地性をしめさないような溶液中で走地性をしめす性質によってスクリーニングされるという事実[15]や, 自発性の繊毛打逆転反応によって走地性が抑制される[16]ということから, 十分に考えられることである. さらに, 細胞の後端部に機械的な刺激を与えたり, 周囲の液に振動を与えると, 繊毛膜は過分極を起こし, それに続いて繊毛打の頻度が増加し前進運動が加速される. 本研究でしめされたような比較的遊泳速度の速い, 軌跡の直線的なゾウリムシはこのような前進運動の加速さ

れた状態にある可能性もある。

細胞の前、後端部の刺激は細胞膜の膜電位の変化として受容され、この変化はおよそコンマ数秒の時定数で回復する。さらに、細胞に加えられる刺激による他の細胞内の状態の変化や刺激の記憶はコンマ数秒以上持続することが推測できる。ゾウリムシの代表的な遊泳速度はおよそ1 mm/secであり、器壁や器壁近くの境界層から受ける刺激の行動におよぼす影響は、ゾウリムシが回避行動を示した後コンマ数 mm 以上遊泳しても残存する。ここで用いられたような運動の自由度を2次元内に規制してしまうような狭いチャンバーでは、ゾウリムシはチャンバー側壁からの機械的な刺激を受けている可能性は排除できない。側壁への細胞の前端部や後端部の衝突の頻度は狭いチャンバーでは当然増加すると考えられる。

ゾウリムシが走地性をしめすためには、容器の内径も重要であることが報告されている[17]。内径が1.8 mm以下の管の中では、ゾウリムシは負の走地性をしめさない。はっきり重力走性が現れるのは内径2.4 mm以上の場合である。おそらくこれも重力走性と機械的な刺激との密接な関係に起因するものであろう。

機械的な刺激と重力走性との関係を調べるため、遊泳槽に積極的に振動を与え、重力の方向とこの振動の方向との関係を解析する研究もすでに始まっている[18, 19]。

以上のように遊泳の自由度を2次元に規制した場合、遊泳行動に及ぼす機械的な刺激の影響は避けられない。我々は、3次的に自由遊泳できる広いチャンバー中のゾウリムシの3次元遊泳像を2つの2次元像に分けて記録することのできる装置を開発し、それを用いてさまざまな重力条件下でのゾウリムシの遊泳行動を観察、記録、解析したのでその結果をここに報告する。

3.1 材料と方法

ゾウリムシ

ゾウリムシ (*Paramecium caudatum*) は、稲藁の煮汁中で *Klebsiella pneumoniae* をえさとして24°Cで培養した。増殖安定期に入った細胞を集め、実験液(2 mM KCl・0.25 mM CaCl₂・0.5 mM Tris 緩衝液 (pH 7.2)) で洗った。実験液に懸濁したゾウリムシは、内径約1 cm 角、高さ5 cm のチャンバーに入れた。1 G 条件下でチャンバー内のゾウリムシは明確な負の走地性をしめした。これは各実験のたびごとに確認した。

3次元遊泳解析用装置

3次元遊泳解析用装置の概要を図10に示した。1×1×5 cm の5面が透明なチャンバー中のゾウリムシは、チャンバーの底部から吸熱フィルターを通したハロゲンランプからの平行光で照らされ、2枚の鏡によって正面および側面の2方向からの2次元像に分けられる。それぞれの像は、色によって識別できるようにそれぞれ赤と緑のフィルターを通して着色した。2つの像はハーフミラーによって再び1つの像に重ね合わされ、テレビカメラでとらえられ、VTR に記録される。

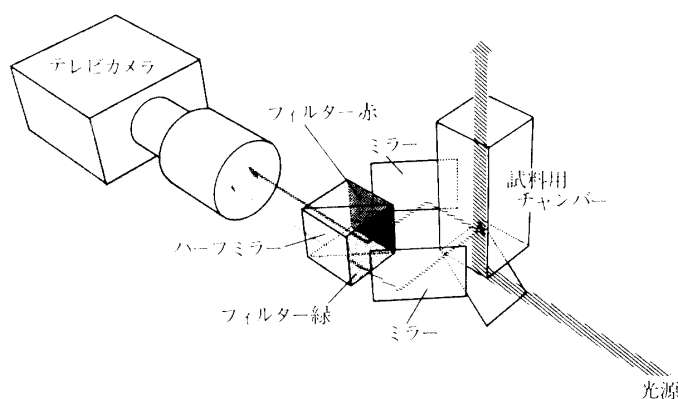


図 10 3次元遊泳解析用装置の概要

さまざまな重力条件下での遊泳行動の観察

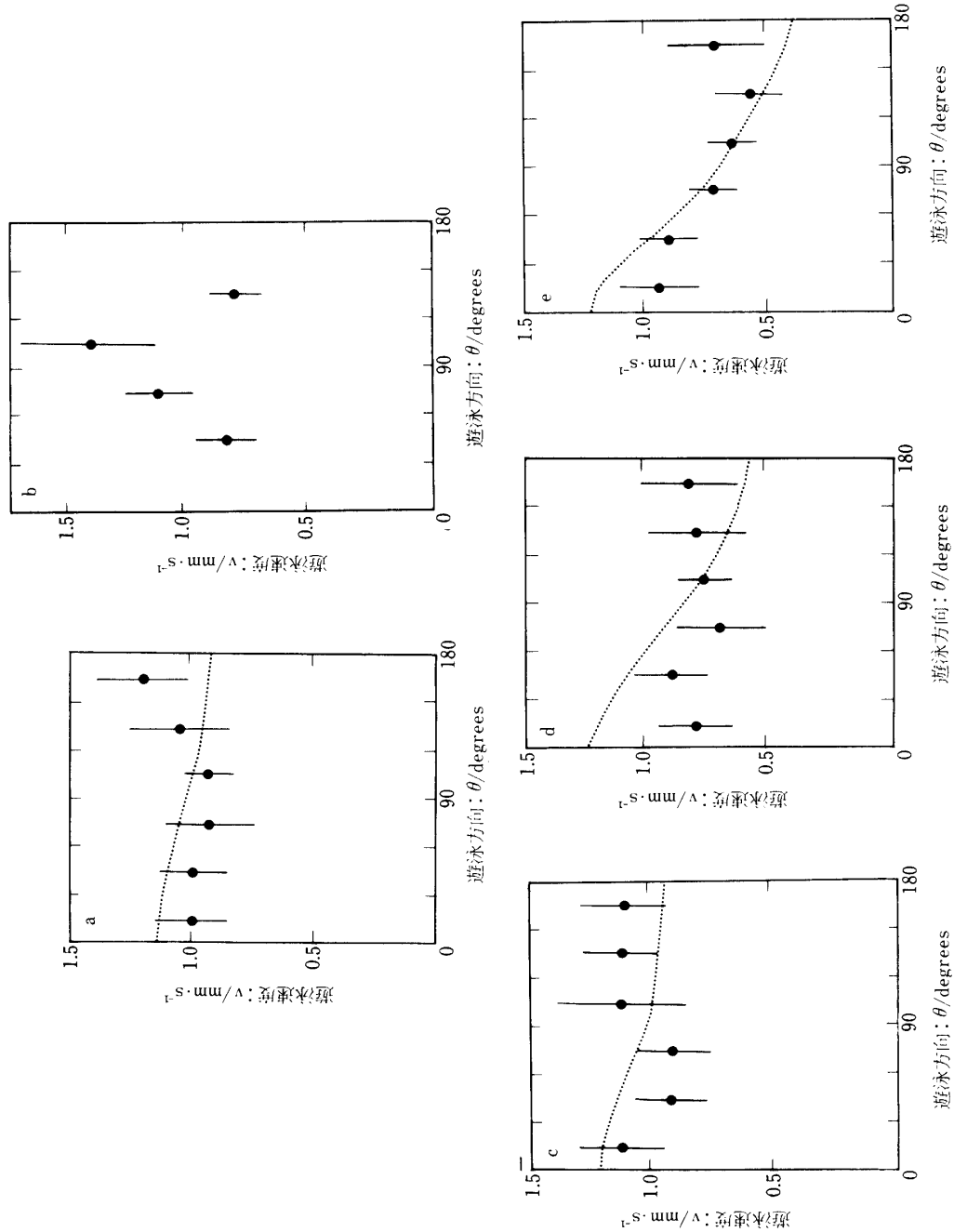
1G下での実験, 落下塔からの自由落下による低重力下での実験, 大型遠心機による過重力下での実験は3次元遊泳解析用装置をそれぞれの実験系に組み入れることによって行った。記録された遊泳行動のデータの解析についてはゾウリムシの位置を表す座標が3次元座標になる以外は2次元内に遊泳行動を規制したときと同様である。

3.2 結果と考察

自由な3次元遊泳が可能なチャンバー内では時間が経っても円弧を描いて遊泳するような細胞はほとんど観察されず, 1時間後で5%以下という低い頻度であった。チャンバー内でのフォーカスを合わせる位置によって, 自由遊泳中の自発的な方向変換とチャンバー側壁に衝突したことによる方向変換は十分に区別できるものであった。

図11には1G(a), 低重力(b), 2G(c), 3G(d), 4G(e)条件下での各遊泳方向に対する実測した遊泳速度(各点)と2次元内に遊泳を規制したときに用いた重力を感知しないと仮定した理論曲線と同様にして求めた曲線(点線)がしめされている。低重力下での実験ではまだデータ数の不足によりはっきりとした結論が出せない状況である。1G, 2G, 3Gでは遊泳速度の実測値は理論曲線とは離れていることがわかった。4Gでは一部の実測値は理論曲線から外れているものの, ほとんど理論曲線にのっていることがしめされた。4G条件下では数分でかなりの数の細胞が底まで落ちて溜った状態になった。このことは自由な3次元遊泳を行い重力による沈降に打ち勝って負の走地性を明かにしめすような条件下のゾウリムシは遊泳方向にしたがって遊泳速度を調節し得るか, 遊泳速度を検知しこれを調節し得ることをしめしている。これは遊泳を2次元に規制したときの円弧に近い軌跡で泳ぐゾウリムシの場合と一致する。

今後データの蓄積を図りつつ, さらに詳しい解析を行う必要があり, 特に低重力条件下での実験は, データを増やすために落下塔での実験のほか低重力環境の長秒時化を図る



(a)1G下, (b)低重力下, (c)2G下, (d)3G下, (e)4G下. 点線は重力を感じないと仮定したときの遊泳速度の方向依存性についての理論曲線, 各点は実測値である.

図 11 3次元遊泳解析装置を用いて計測した遊泳速度と遊泳方向の関係

ことのできる気球実験が大変に有用な手段になると考えられる。一様に散らばったゾウリムシが水面近くに次第に集まって負の走地性がはっきりと確認できるようになるまでに要する時間は条件によって違いはあるが、数10秒から1分位のオーダーであることから低重力条件の長秒時化は重要である。

またこの3次元遊泳解析装置を用いてさまざまな重力環境下での方向変換頻度と変換後の方向分布、チャンバー側壁に衝突したあとの方向分布、振動など機械的刺激を与えたときの遊泳行動などについても解析し、ゾウリムシの重力走性のメカニズムの解明を目指すつもりである。

参 考 文 献

- [1] Jenings, H. S. 1906 "Behavior of the lower Organisms", Indiana Univ Press.
- [2] 村上 彰, 高橋景一: 1988 宇宙生物科学, 2(4): 228-237.
- [3] Cogoli, A., Bechler, B., Muller O. and Hunzinger, E., 1988, ESA SP-1091: 89-100.
- [4] Richoilley, G., Templier, J., Bes, J. C., Gasset, G. and Planel, H. 1988, ESA SP-1091: 69-73.
- [5] Parfenov, G. P. 1975, "Foundation of Space Biology and Medicine", ed. Calvin, M. and Gazenco, O. G. Chapter 19, pp. 707-739.
- [6] 山下雅道, 最上善広, 奥野 誠, 雛田元紀, 塚本茂樹, 名取通弘, 廣澤春任, 山上隆正, 秋山弘光, 1987, 大気球シンポジウム講演論文集, pp. 37-41.
- [7] 最上善広, 奥野 誠, 山下雅道, 馬場昭次, 1987, 大気球シンポジウム講演論文集, pp. 41-43.
- [8] 最上善広, 奥野 誠, 山下雅道, 馬場昭次, 1987, 日本宇宙生物科学会, 第1回大会講演会論文集, pp. 110-114.
- [9] 大矢真弓, 最上善広, 奥野 誠, 山下雅道, 馬場昭次, 1988, 日本宇宙生物科学会, 第2回大会講演論文集, pp. 46-47.
- [10] Mogami, Y., Kimura, T., Okuno, M., Yamashita, M. and Baba, S. A., 1988, Proceeding of the 16th International Symposium on Space Technology and Science ed. Kondoh, K. et al. pp. 2351-2354.
- [11] Mogami, Y., Oobayashi, C., Yamaguchi, T., Ogiso, Y. and Baba, S. A. 1988, J. Exp. Biol. 137: 141-156.
- [12] 和泉明美, 大矢真弓, 最上善広, 奥野 誠, 山下雅道, 馬場昭次, 1988, 大気球シンポジウム講演論文集, pp. 63-66.
- [13] Izumi, A. and Nakaoka, Y. 1987, Cell Motility and the Cytoskeleton, 7(2): 154-159.
- [14] Eckert, R. 1972, Science 176: 473-481.
- [15] Kung, C. 1971, Z. vergl. Physiologie, 71: 142-164.
- [16] Roberts, A. M. 1970, J. Exp. Biol. 53: 687-699.
- [17] Taneda, K., Miyake, S. and Shiota, A. 1987, Zool. Sci. 4: 789-795.
- [18] 村上 彰, 高橋景一, 1988, 日本宇宙生物科学会, 第2回大会講演論文集, p. 45.
- [19] 村上 彰, 石井直方, 山下雅道, 高橋景一, 1988, 大気球シンポジウム講演論文集, pp. 59-62.