

原生生物における電磁場の影響

中岡保夫 (阪大院・生命機能研究科)

1 はじめに

人間のつくりだした電磁場環境が、ヒトをはじめとする生物にどのような影響を与えるのか、ということが問題となっている。ここでは原生生物、特にゾウリムシに対する電磁場の影響について述べる。ゾウリムシは長さ 0.2 mm ほどの単細胞生物で細胞表面には数千本の繊毛が生えており多数の繊毛が協調して打つことにより水中を泳ぎ回る。繊毛の運動は、繊毛または細胞内に流入した Ca^{2+} によって打つ向きと頻度とが調節されている。細胞膜には Ca^{2+} 、 K^+ などを選択的に通す蛋白イオンチャネルが分布している。また細胞膜にはこれらのイオンを選択的に輸送するイオンポンプが備わっていて、細胞内の Ca^{2+} 濃度は低く、 K^+ 濃度は高く保たれている。細胞膜にあるイオンチャネルは自発的に開閉するのみでなく環境からのさまざまな刺激に応答して開閉し、結果的に細胞内の Ca^{2+} 濃度を変動させることにより繊毛運動と泳ぎのパターンを変える。すなわちゾウリムシの泳ぎはイオンチャネルを流れる微小な電流によって制御されている。もしも電磁場がこのような微小な電流に影響するならばゾウリムシの泳ぎのパターンが変化するのではという発想で、磁場環境の中にゾウリムシを置いてみた。

2 変動磁場の影響

ゾウリムシの入ったポリスチレン製の容器を、最大で 0.65T までの変動磁場 (60Hz) を発生する磁極の間に入れた。磁場発生装置は磁極が上下 2cm 間隔で平行に設置されているため容器の真横側にビデオカメラを置き、

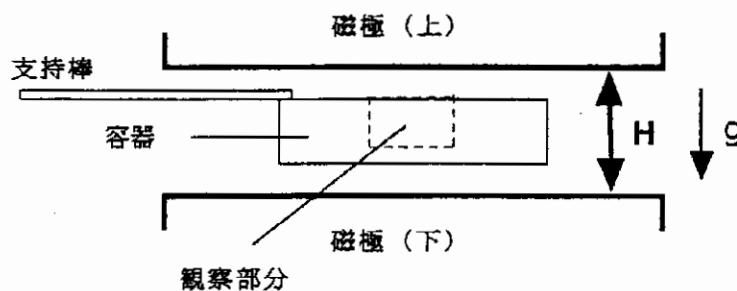


図1 横から見た磁極とゾウリムシ容器の配置

カメラと反対側のランプで暗視野照明し横から眺めるという方式でゾウリムシの泳ぎを観察した (図1) [1]。その結果、磁場強度が 0.4T 程度よりも弱い時には泳ぎの変化は認められなかったが、これ以上に強くするとゾウリムシは液の上部に非常によく集まるようになった (図2)。

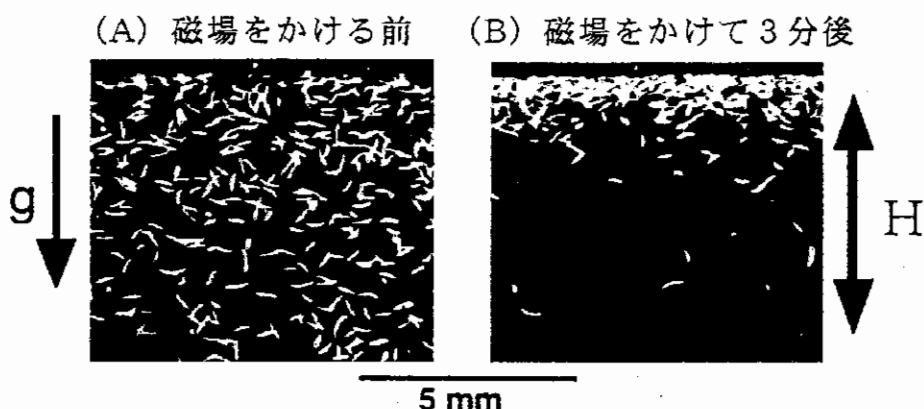


図2 変動磁場 (0.6 T) をかける前後でのゾウリムシの上下方向分布

磁場をかけて3分後に上部に集まった細胞数は、磁場強度が 0.6 T の時最大でこれ以上の磁場強度ではむしろ減少した。減少した理由は、強い磁場でゾウリムシはいったん上部に集まった後、磁場に不感受性になったかのように分散し始めたためである。最もよく集まる 0.6 T の磁場をかけ始めてから上部に集まる時間経過を見ると、磁場をかけて 2-3 分で最大の集まり程度を示し、その後磁場がかかっている状態でも徐々に分散し磁場をかけていない時と同じ分布に戻った。

それではゾウリムシは磁場中でどのような泳ぎ方をするために上部に集まるのか、磁場をかけて上部に集まり始めた時の泳ぎを解析してみた。ゾウリムシが 10 秒間ほどの間に泳いだ軌跡を見ると、多くの場合上に開いた凹面型のゆるいカーブを描いており、変動磁場中でゾウリムシが泳ぎの向きを徐々に上向きに変えてゆく泳ぎをしていることが分かった。このような泳ぎは、ゾウリムシが重力と反対に液面上部に向かって集まる負の走地性を示す時の泳ぎとよく似ている。したがって、変動磁場はゾウリムシが本来持っている負の走地性をより強調させているように見える。

ゾウリムシが重力と反対向きに泳ぐ負の走地性は、流体力学的な説明と生理学的な説明がされている。流体力学説では、ゾウリムシ細胞の重心が繊毛による推進力の総和の中心よりも細胞の後側にあって 2 つの力の向きが異なるために、それらの合力は細胞を上に向かわせるような回転トルクを発生すると考える。生理学説では細胞が上に向いた時と下に向いた時、細胞の後端部膜または前端部膜に細胞内容物のわずかな圧力が加わるために、それぞれ特異的な機械的刺激感受性のイオンチャネルが開く。これが引き金となって細胞内 Ca^{2+} 濃度の増減を引き起こし、上に向かう時はより速く下に向かう時はより遅く泳ぐので上に集まると説明する。生理学的な説明は魅力的なので、実際にゾウリムシの上または下に向かって泳ぐ時の遊泳速度を変動磁場の有無で測定し比較してみたが、遊泳速度の有意な変化は見られな

った。したがって磁場が走地性を強調させるという観点からすると、生理学説よりも流体力学説の力学的因子のいずれかに変動磁場が影響するという可能性が考えられる。しかしそれでは具体的にどの因子にどのような影響を与えるのかは今後さらに検討する必要がある。

ここで用いた強力な変動磁場は、うず電流を誘導し電流は溶液の温度をわずかに上昇させる。ゾウリムシは電流や温度にも敏感に応答するのでこの影響も考えられる。しかし電流や温度に対するゾウリムシの応答を調べてみても、先に述べた凹面型のゆっくりと上側に曲がる軌跡につながる観察はこれまでのところ確認されていない。

3 定常磁場の影響

変動磁場はうず電流の発生をともなうが定常磁場では磁場だけの影響を見ることができる。そこでまず変動磁場と同じように定常磁場でもゾウリムシが容器の上部に集まるかどうかを調べた。図1と同じ配置で磁極に永久磁石（ネオマックス、住友特殊金属）を用い、平行磁場の強度 0.68 T 中のゾウリムシの泳ぎを観察した。しかし変動磁場で見たようにゾウリムシが上部に集まることはなかった。

次に定常磁場中のゾウリムシの泳ぎを、ゾウリムシの種類、培養時期、外液の組成などの条件を変えて観察してみた。その結果、増殖期のゾウリムシを外液中の K^+ 濃度を下げて膜電位を過分極状態に保ちゾウリムシがほとんど自発的な方向変換をせず直進して泳ぎ続けるという条件で磁場中に置くと、ゾウリムシは磁場と垂直の方向に泳ぎ始めることが見つかった（図3）。

この時のゾウリムシの泳ぎの軌跡は、初めいろいろな向きに泳いでいたゾウリムシが徐々にその向きを変え数秒後には磁場に対して垂直の方向に泳ぐことが分かった[2]。ゾウリムシが磁場に対し垂直の方向に泳ぐ理由として、我々はゾウリムシの細胞内器官がもつ反磁性

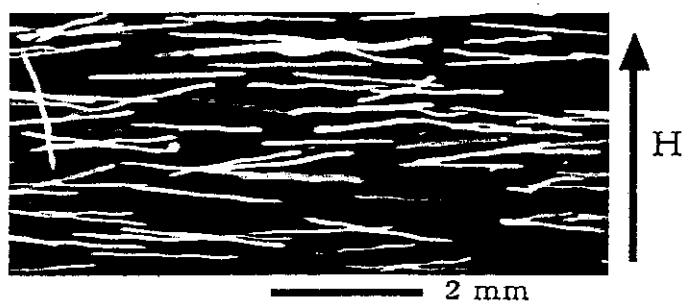


図3 定常磁場（0.68T）中のゾウリムシの泳ぎ軌跡

のためではないかと予想した。繊毛の中にある微小管などは、その構成ユニットのチューブリンが重合して長い管状の構造を形成している。このような重合体の場合、強い磁場の中に置かれると構成ユニットの反磁性が加算され、重合体の長軸方向に外部磁場と反対向きの反磁性が

生まれる[3]。ゾウリムシは、数千本の繊毛が細胞表面に並んで生えているので、反磁性がさらに加算されゾウリムシの泳ぎに影響することが予想される。またゾウリムシの細胞膜直

下には、トリコシストと呼ばれる一種の刺胞（ビール瓶型の袋の中に蛋白ユニットが準結晶状態につまっている）が細胞膜の面に対し垂直向きに多数配列しており、これも反磁性を持つことが予想される。そこでゾウリムシから繊毛（長さ $10\ \mu\text{m}$ ）とトリコシスト（長さ $4\ \mu\text{m}$ ）を分離して集め、それぞれ $0.78\ \text{T}$ の定常磁場の中に入れ顕微鏡で観察した。すると、繊毛とトリコシストは、ブラウン運動のために常にその向きを変動させているが、一定時間に多数の繊毛とトリコシストの磁場方向に対する角度を測定しその分布を調べると、いずれもその長軸を磁場と平行にして並ぶものが多数を占めた（図4）。

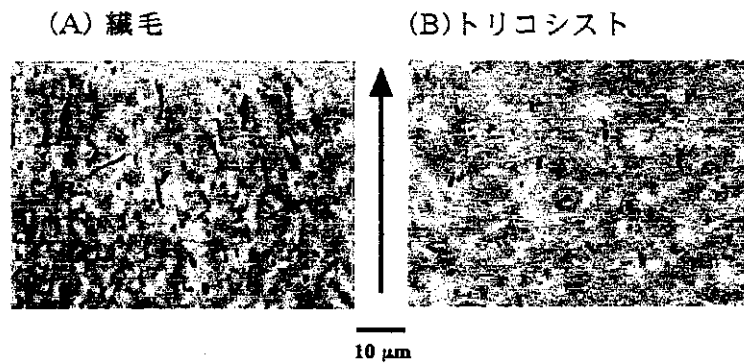


図4 定常磁場中 ($0.78\ \text{T}$) での繊毛とトリコシストの配列

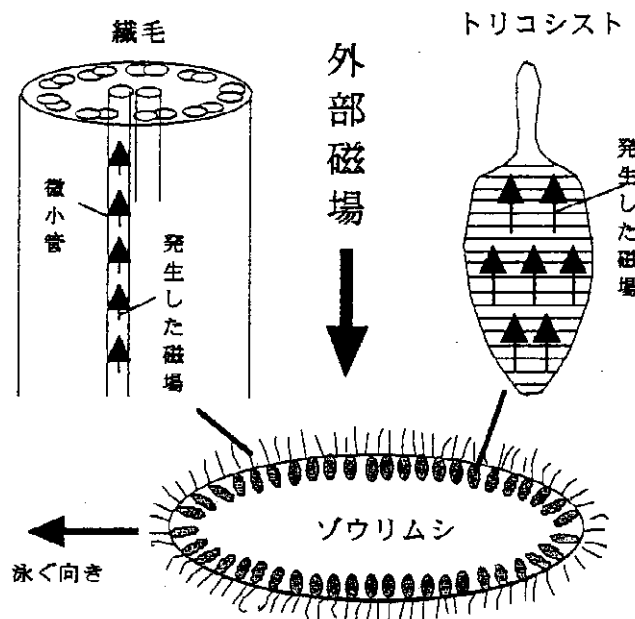


図5 繊毛とトリコシストの反磁性とゾウリムシの泳ぎ

ゾウリムシは一匹あたり数千本の繊毛とトリコシストを持ち、細胞の形は細長い楕円体に近く、繊毛とトリコシストの大部分は細胞の長軸に対し垂直方向に向いている。したがって、定常磁場の中で繊毛とトリコシストが磁場と平行方向に並ぼうとすると細胞の長軸は磁場と

垂直方向に向くと安定な状態になるので、自発的な方向変換をしない条件下で直進して泳ぐゾウリムシは、磁場方向に対し徐々に垂直方向に向かう泳ぎになると考えられる (図5)。

ところが、変動磁場中 (0.65 T、60 Hz) でもゾウリムシは磁場と垂直方向に泳ぐかどうかを試したところ、泳ぎの向きは全く影響されなかった。定常磁場の場合には、0.6 T でも磁場方向と垂直の向きに泳ぐので、交流磁場の強度が低いせいで泳ぎの方向が影響されなかったというわけではない。変動磁場では磁場の向きが常に変動しており、ゾウリムシ細胞に生じた反磁性も常に変動するため泳ぎの向きを変えるほどの力にはならないのであろうか。しかし、変動磁場であっても磁場方向は変わらないので、定常磁場と同じく磁場と垂直向きに泳ぐように反磁性は働くと予想されるが、そうはならなかった。変動磁場と定常磁場との影響を比較すると、まだよく分からない問題が残されている。

ゾウリムシの泳ぐ向きを変える定常磁場の強さは地球磁場の約 1 万倍である。これほどの強い磁場は普通自然界で出会うことはないので、ゾウリムシの泳ぎ方が変化したからといってゾウリムシは磁場を感じているとは言えないし、生理的に意味のあることでもない。しかし、超伝導磁石などの設置された人工的な磁場環境下では、細胞とか細胞内小器官が磁場によって配行する可能性があることを示している。

参考文献

- [1] Y. Nakaoka, K. Shimizu, K. Hasegawa and T. Yamamoto, *Bioelectromagnetics*, 21:584 (2000).
- [2] Y. Nakaoka, R. Takeda and K. Shimizu, *Bioelectromagnetics*, 23:607 (2002).
- [3] R. Emura, T. Takeuchi, Y. Nakaoka and T. Higashi, *Bioelectromagnetics*, 24:347 (2003).