

特 集

「第14回日本臨床環境医学会総会シンポジウム」

(臨床環境14:88~91, 2005)

原生生物における電磁場の影響

中 岡 保 夫

大阪大学大学院・生命機能研究科

I. はじめに

人間の作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不明な点が多い。ここでは電磁場が原生生物の一種ゾウリムシの遊泳行動に影響した例について述べ、その作用の仕方を考察する。ゾウリムシは長さ0.2mmほどの単細胞生物で、細胞表面に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。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おり、繊毛の運動はイオンチャネルを通して繊毛または細胞内に流入した Ca^{2+} によりその打つ向きと頻度が調節されている。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も応答し、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遊泳パターンを変える。すなわちゾウリムシの泳ぎ行動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。そうすると電磁場はこのような微小な電流に作用しゾウリムシの遊泳行動に影響する可能性がある。一方、ゾウリムシ細胞は微小管などの多数の蛋白繊維や脂質膜系により構成されている。これら蛋白や脂質は強い磁場中では磁気異方性による反磁性を示し磁場方向と一定の角度を保って配向しようとする。細胞成分の持つ反磁性が細胞全体として加算されその合力が

大きくなった場合、ゾウリムシの遊泳方向が変化する事が考えられる。

II. 変動磁場の影響

我々の用いた変動磁場発生装置(可変最大0.65 T, 60Hz)は2枚の磁極板が上下2 cmの間隔で平行に配置されている(図1)。磁極板の間にゾウリムシの入った透明なポリスチレン製の容器を

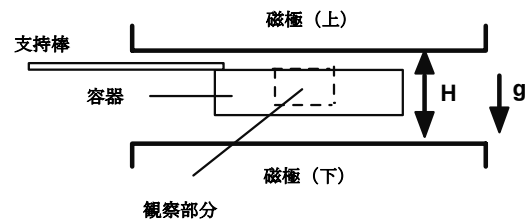


図1 磁極とゾウリムシ容器の配置

置き、ゾウリムシの泳ぎを横から観察した¹⁾。

変動磁場強度が0.4 Tよりも弱い時、ゾウリムシの泳ぎに変化は認められない。しかしこれ以上に強くしてゆくと徐々にゾウリムシは液の上部側に集まるようになり、磁場強度が0.6 Tの時には極端に上部側に片寄った分布になった(図2)。

変動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

《Key words》 electromagnetic field, Paramecium, membrane channels, cilia, diamagnetic anisotropy

別刷請求宛先: 中岡保夫

〒560-8531 豊中市待兼山町1-3 大阪大学大学院生命機能研究科

Reprint Requests to Yasuo Nakaoka, Biophysical Dynamics Laboratories, Graduate School of Frontier Bioscience, Osaka University, 1-3 Machikaneyama Toyonaka, Osaka 560-8531 Japan

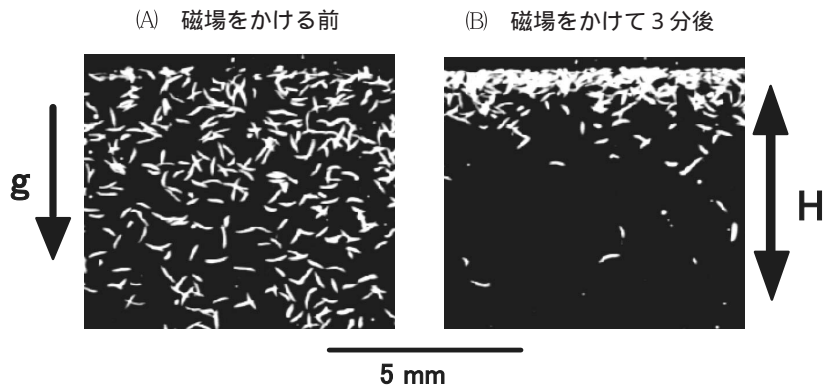


図2 変動磁場 (0.6 T) をかける前後でのゾウリムシの上下方向分布

も徐々に分散し始め数分後には磁場をかける前と同じような分布になった。ゾウリムシは磁場中でどのような泳ぎ方をして液面上部に集まるのか、磁場をかけて上部に集まり始めた時の泳ぎを解析すると、多くの場合ゾウリムシの泳いだ軌跡が上に開いた凹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ぐ向きを徐々に上向きに変えてゆくために液面上部に集中することが分かった。

このような泳ぎは、ゾウリムシが重力を感知して重力と反対向きに液面上部に集まる（負の走地性）時の泳ぎとよく似ているが、負の走地性ではこれほど極端に上部に集まることはない。変動磁場はゾウリムシが本来持っている重力感受性の感度を極度に高めているかのように見える。一方、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。ゾウリムシは温度感受性のイオンチャネルを持っており温度変化に敏感に応答し、温度勾配中では適応した温度付近に集まろうとする性質（走熱性）がある。しかしながら走熱性の泳ぎでゾウリムシの軌跡がゆっくりと彎曲する軌跡は観察されていないし、これほど極端に上部に集中することも考えにくい。強い変動磁場はゾウリムシの持つ走地性や走熱性の感度を高くしているかのように見えるが、その詳細はまだよく分からない。

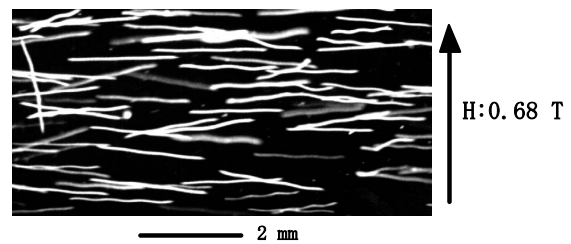


図3 定常磁場中のゾウリムシの泳ぎ

III. 定常磁場の影響

定常磁場の場合、うず電流は発生しないので磁場だけの影響を見ることができる。そこでまず定常磁場でも変動磁場と同じように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上部に極端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、外液の組成などを変えて観察した。その結果、培養初期のゾウリムシを K^+ 濃度の低い液に入れ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ような条件にすると、ゾウリムシは磁場と垂直の向きに泳ぐことが見つかった（図3）。

磁場をかけ始めた時のゾウリムシの泳ぎを見ると、初めいろいろな向きに泳いでいたゾウリムシ

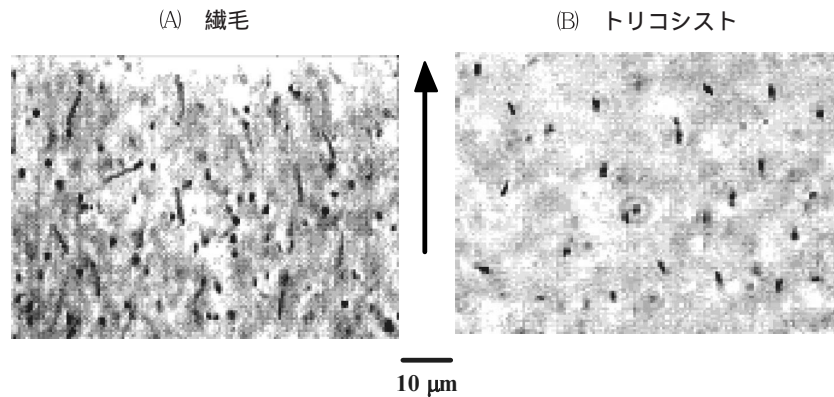


図4 定常磁場中 (0.78 T) での繊毛とトリコシストの配列

が徐々にその向きを変え数秒以内で磁場方向に対し垂直の向きになってそのまま直進する²⁾。ゾウリムシが磁場に対し垂直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のためではないかと予想した。繊毛の中にある微小管は、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外部磁場と平行に並ぼうとする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）が細胞の膜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 μm）とトリコシスト（長さ4 μm）を分離して集め、それぞれ0.7 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、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方向と平行にして並ぶものが多かった（図4）。

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いの

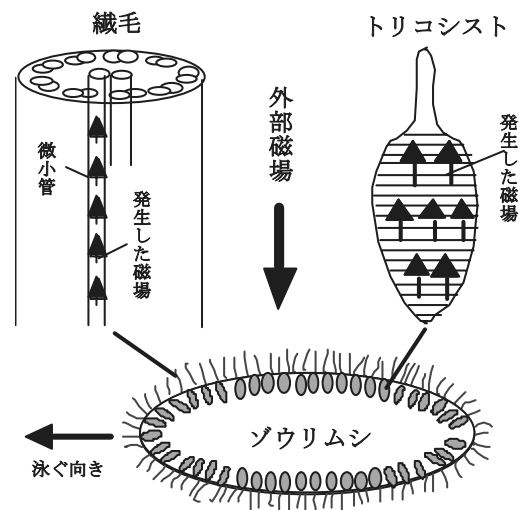


図5 繊毛とトリコシストの反磁性とゾウリムシの泳ぎ

で、多数の繊毛とトリコシストは細胞の長軸に対し垂直方向に向いている。したがって、定常磁場の中で細胞の長軸が磁場と垂直方向に向いた時に多くの繊毛とトリコシストが磁場と平行に並び安定な状態になるので、自発的な方向変換をせず直進して泳ぐ場合には、磁場方向に対し垂直の方向に泳ぐと考えられる（図5）。

繊毛やトリコシストの持つ反磁性が加算されて磁場方向と垂直向きに泳ぐのであれば、変動磁場中でも定常磁場と同じように磁場と垂直向きに泳ぐと予想される。ところが、変動磁場 (0.65 T、

60Hz) によってゾウリムシの泳ぎ方向は全く影響されなかった。定常磁場の場合、0.6 T でも磁場方向と垂直の向きに泳ぐので、磁場強度が弱いせいではない。変動磁場では常に磁場の向きが逆転し同時に磁場強度が変動しているので、ゾウリムシ細胞に生じる反磁性も常に変動する。そのために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の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、そうはならない。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。

ここでみたゾウリムシの泳ぎに影響する磁場の強さは地球磁場の1万倍程度である。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、ゾウリムシにとって生理的に意味のあることではないかもしれない。しかし、超伝導磁石などによる強い磁場環境下では、細胞とか細胞内小器官が磁場によって配向し、そのために細胞の生理的機

能に何らかの影響の出る可能性があることを示している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、有役な議論をしていただいた京都大学基礎物理学研究所研究会 (YITP-W-03-01) に感謝します。

文献

- 1) Nakaoka Y, Shimizu K, et al: Effect of a 60 Hz magnetic field on the behavior of Paramecium. *Bioelectromagnetics* 21: 584-588, 2000
- 2) Nakaoka Y, Takeda R, et al: Orientation of Paramecium swimming in a DC magnetic field. *Bioelectromagnetics* 23: 607-613, 2002
- 3) R Emura, T Takeuchi, et al: Analysis of anisotropic diamagnetic susceptibility of a bull sperm. *Bioelectromagnetics* 24: 347-355, 2003