
「ゾウリムシの電気走性」実験 追加資料

この実験では電磁気学の理論を使って考察するが、電磁気学を忘れてしまっている人もいるかも知れない。そこで、考察の助けとするために、この資料で電磁気学の理論を説明する。また、実験に関してもテキストで書ききれなかった詳細を説明しておくので、参考にしてもらいたい。

理論

I. ゾウリムシに加わる電気力

電界によってゾウリムシにくわえられる物理的力は、一般にクーロン力と誘電泳動力のふたつである。それぞれの力について、電磁気学の理論に基づいて考えてみる。

A. クーロン力 f_c

クーロン力は電界が電荷に対して及ぼす力である。細胞は一般に負に帯電しているためクーロン力が作用する。ゾウリムシのもつ全電荷を q 、外部から印加された電界を \mathbf{E} とすると、クーロン力 \mathbf{f}_c は

$$\mathbf{f}_c = q\mathbf{E} \quad (1)$$

で与えられる。

B. 誘電泳動力 f_e

誘電泳動力は分極 \mathbf{m} に作用する電気力である。分極 \mathbf{m} はベクトル量で、正負二つの電荷 q と $-q$ が距離 \mathbf{d} を隔てて存在するとき、式

$$\mathbf{m} = q\mathbf{d} \quad (2)$$

で定義される。分極は電氣的には中性なので、電界とは何の相互作用もなさそ

うに見えるが、実際には誘電率を変えたり、分子間力の原因にもなっている。特に不均一な電界中では、電荷 q の位置 $\mathbf{r}-\mathbf{d}/2$ における電界と、そこから \mathbf{d} だけ離れた $-q$ の位置 $\mathbf{r}+\mathbf{d}/2$ における電界は強さが異なる場合がある。このとき、二つの電荷に加わる力の和 \mathbf{f}_d は

$$\mathbf{f}_d = q\mathbf{E}_{(\mathbf{r}-\mathbf{d}/2)} - q\mathbf{E}_{(\mathbf{r}+\mathbf{d}/2)} \quad (3)$$

となり、一般には 0 ではない。この力を誘電泳動力と呼ぶ。電界の差を空間微分 ∇ (ナブラ) を使った一次近似で表すと

$$\mathbf{E}_{(\mathbf{r}-\mathbf{d}/2)} - \mathbf{E}_{(\mathbf{r}+\mathbf{d}/2)} \simeq \nabla\mathbf{E}\cdot\mathbf{d} \quad (4)$$

となる。これを式(3)に代入すると以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_d &\simeq q\nabla\mathbf{E}\cdot\mathbf{d} \\ &= \nabla\mathbf{E}\cdot\mathbf{m} \end{aligned} \quad (5)$$

この、分極 \mathbf{m} に対して電界の空間微分 $\nabla\mathbf{E}$ が加える力が誘電泳動力である。

ゾウリムシの分極率(電界 \mathbf{E} とそれによって発生する分極 \mathbf{m} の比)を α とする。電界 \mathbf{E} によって誘導されるゾウリムシの分極 \mathbf{m} は

$$\mathbf{m} = \alpha\mathbf{E} \quad (6)$$

なので、これを式(5)に代入すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_d &\simeq \nabla\mathbf{E}\cdot\alpha\mathbf{E} \\ &= \frac{1}{2}\alpha\nabla|\mathbf{E}|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

が得られる。 ∇ は3方向の空間微分で、微分される量の傾きを表す。よって、誘電泳動力 \mathbf{f}_d は電界強度の2乗の傾きに比例することが分かる。半径 R の球体の分極率 α は、周囲の溶液、および細胞の複素誘電率を ε_1^* 、 ε_2^* と表すことで

$$\alpha = 4\pi R^3 \varepsilon_1 \text{Re}[K] \quad (8)$$

と書くことが出来る。ただし、 K はクラジウス・モソッティの因子で

$$K = \frac{\varepsilon_2^* - \varepsilon_1^*}{\varepsilon_2^* + 2\varepsilon_1^*} \quad (9)$$

で定義される^[1]。また複素誘電率 ε^* は交流に対する誘電率で、

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j\sigma / \omega \quad (10)$$

で定義される。 σ は導電率、 ω は角周波数、 j は虚数単位を表す。一般に ε_1 は ε_1^* の実数部ということである。よって、細胞を体積 S の球体として近似すると、分極率 α は、

$$\alpha = \frac{4\pi R^3}{3} 3\varepsilon_1 \text{Re}[K] = 3\varepsilon_1 \text{Re}[K]S$$

で与えられる。

II,細胞膜の膜電位

溶液中に浮かぶ半径 a の細胞に均一な電界 \mathbf{E} をかけると、細胞の両端には

$$V = 2a|\mathbf{E}| \quad (10)$$

の電位差＝電圧降下が発生する¹⁰⁾。つまり細胞の端から端まで進む間に、それだけ電圧が下がっていくことになるが、細胞質の導電率は細胞膜に比べて非常に高いので、ほとんどの電圧は両端の細胞膜だけで降下する。このため、両側 2 枚の細胞膜に発生する膜電位 V_m は、1 枚あたり

$$V_m = a|\mathbf{E}| \quad (11)$$

と近似できる。長さ $200\mu\text{m}$ のゾウリムシでは、 1kV/m の電界中では、 100mV の膜電位が発生することになる。膜電位の変化は細胞に対する刺激となり、細胞の機能に影響を与えることがある。例えば人間の筋肉が収縮したり、びりびりと感じたりするのも膜電位変化によるものである。

実験方法

この実験では、電極を設置した円形のシャーレ中で、水中のゾウリムシに電界をかける。この容器をセルと呼ぶことにする。セルの外周（半径 26mm ）には円形、中心には針状（太さは半径 0.16mm ）の電極が設置されている。この間に電圧をかけると、ほとんど半径方向だけの電界が発生する。

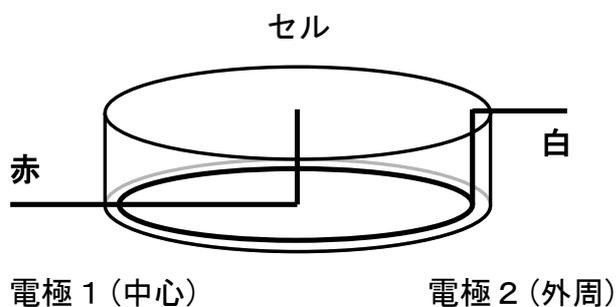


図1 セルの電極配置

直流と交流の電界でそれぞれ実験を行うが、それぞれ別の電源装置を用いるので、二つの班で交代して電源を使用する。ゾウリムシは長時間の通電や熱に弱いので、電圧が高かったり、長時間通電し続けるとすぐに死んでしまう。かわいそうなゾウリムシを殺さないよう、大切にすること。

実験 A 直流電界の作用の観察

- 1, ゾウリムシの入った培養液約 5mL をセルに入れる。
- 2, セルの電極を直流電源に接続し、実体顕微鏡で中心の電極付近のゾウリムシの動きを観察しながら電圧を上げていく。容器の赤端子が中心電極、黒端子が外側電極である。電圧は、出力端子にはテスターをつないで直流 (=)200V レンジで測定する。
- 3, 電圧を上げていったときに、ゾウリムシの動きが変化し始める電圧を測定、様子を記録する。この時、電圧をかけっぱなしにするのではなく、電圧を ON/OFF して観察すると、変化が分かりやすい。
- 4, ゾウリムシが影響を受け始める電圧を測定、そのときの動きの様子を記録する。
- 5, 電圧を固定し、ゾウリムシが影響を受ける領域の半径を求める。3 回以上測定して平均を求められるようにする。
- 6, 予習の結果に従って、ゾウリムシが影響を受け始める電界強度を計算で求める。
- 7, ゾウリムシに変化がなくても、10V 以上の電圧はかけないこと。
- 8, 直流では、中心電極が正の場合と負の場合の二通りで同じ実験を行う。

実験 B 交流電界の作用の観察

- 1, ゾウリムシの入った培養液約 5mL をセルに入れる。
- 2, スライダックに交流用電源ボックスがつないであるので、電源ボックスの出力にセルの電極をつなぐ。電圧は出力端子にテスターをつなぎ、交流 (~)200V レンジで測定する。電圧が 0 なのを確認したら、実体顕微鏡で中心の電極付近のゾウリムシの動きを観察しながら電圧を上げていく。
- 3, 電界に対するゾウリムシの反応を記録する。この時、電圧をかけっぱなしにするのではなく、電圧を ON/OFF して観察すると、変化が分かりやすい。(直流と同じ)
- 4, ゾウリムシが影響を受け始める電圧を測定、そのときの動きの様子を記録する。
- 5, 電圧を固定し、ゾウリムシが影響を受ける領域の半径を求める。3 回以上測定して平均を求められるようにする。
- 6, 予習の結果に従って、ゾウリムシが影響を受け始める電界の強度を計算で求める。

7, ゾウリムシに変化がなくても、30V以上の電圧はかけないこと。

考察のための観察項目

レポートは研究室 HP に掲載されたテンプレートに書き込む。原則当日提出。以下に観察のポイントを挙げる。ゾウリムシの様子を図と文で記録しておくこと。図がなければ結果は評価されない。レポートの考察項目など必要事項はすべて埋めること。

実験前に

- ・電圧をかけないときのゾウリムシの動きはどのようなものか、よく観察して記録しておく。
- ・ゾウリムシの速度はどのぐらいか（ゾウリムシの長さは 200 μm 程度）。

A. 直流電界の効果

- ・電界をかけることで、ゾウリムシの動きはどう変わるのか。
- ・動きに変化が出る電界の強度はいくらか。
- ・正負で違いがあるだろうか。
- ・ゾウリムシはクーロン力によって動かされるのかどうか。
- ・動きに変化が出る際、ゾウリムシの細胞膜に加わる膜電位の値はいくらか。
- ・ゾウリムシが一方の電極に集まる理由を推論する。

B. 交流電界の効果

- ・ゾウリムシは交流電圧をかけると、どの電界強度で、どんな動きをするのか。
- ・ゾウリムシは電極に集まるか、集まらないのか。
- ・ゾウリムシの分極率から求めた誘電泳動力の大きさと、粘性力から推測したゾウリムシの推進力の大きさを、どちらが大きい比較してみる。

参考文献

- [1] T.B.Jones, "Electromechanics of Particles", Cambridge Press.
[2] J.C.スレーター、N.H.フランク、「電磁気学」、丸善

[3] Naoko Ogawa, et.at. “Dynamics Model of Paramecium Galvanotaxis for Microrobotic Application”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1258-1263(Apr.2005)