

ゾウリムシの運動制御のための電流制御型電気刺激デバイス

A Current Controlled Electrostimulation Device for the Motion Control of Paramecia

学 山根 淳(東大) 学 尾川 順子(東大) 正 奥 寛雅(科技機構さきがけ/東大)
正 橋本 浩一(東大/科技機構さきがけ) 正 石川 正俊(東大)

Jun Yamane, Naoko Ogawa, Hiromasa Oku, Koichi Hashimoto and Masatoshi Ishikawa
University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
PRESTO, JST, 4-1-8 Honcho Kawaguchi, Saitama, Japan

Key Words: *Organized Bio-Modules, Micromachine, Paramecium, Galvanotaxis, Current Control, Electric Potential Gradient in the Liquid*

In this Paper, we propose a current controlled electrostimulation device to control and predict the shape of electric potential gradient in the liquid. We aim at controlling the motion of paramecia by using paramecia's galvanotaxis. By using this device, we can predict the shape of electric potential gradient in the liquid, and control paramecia more precisely.

1. はじめに

微生物はその進化の過程で高感度なセンサと高効率なアクチュエータをその体内に獲得してきた。このような微生物をセンサとアクチュエータが統合された一行動単位(バイオモジュール)ととらえ、情報処理機構と結合することで柔軟かつ多様な機能を提供する超大規模マイクロシステムの実現を目指すオーガナイズドバイオモジュール(OBM)という概念が尾川らにより提案されている¹⁾。これまで、特に微生物の運動制御に注目した研究がおこなわれている。

OBMにおける対象運動制御は、一部の微生物が持つ負の走電性という性質を利用して実現されている。負の走電性とは、微生物が、その周位の溶液に印加された直流電位勾配に反応して陰極に向かって泳ぐ性質であり²⁾、この性質を利用すると溶液中の電場分布の方向と強さを制御することで、微生物が泳ぐ方向とその速度を制御できる。これまで、尾川らはゾウリムシを対象として、その二次元方向の運動を制御することに成功している³⁾。また、これ以外の、負の走電性を利用した微生物の制御の研究として伊東によるゾウリムシの運動方向の制御とそれを利用したゾウリムシによる微小物体の輸送実験があげられる⁴⁾。

このような負の走電性を利用した微生物の運動制御手法をより定量的に研究するためには、微生物を含む溶液内の電位分布を精度よく制御することが重要になる。しかしこれまで、微生物の運動制御を目的として、溶液中の電位分布の生成手法を詳細に議論した研究はなされていない。

そこで本論文では、負の走電性を利用してゾウリムシの運動を制御する手法をより厳密に研究するために、より高い精度で溶液中の電位分布の制御が可能となる電流制御手法を提案する。次に、提案手法に基づいて開発した電流制御型電気刺激デバイスを説明し、そのデバイスを用いておこなった電位分布制御実験から、提案手法の有効性を示す。

2. 微生物を含む溶液の電気的性質

まず、今後の議論のために、微生物を含む溶液の持つ電気的性質について説明する。

一般に、微生物は生存のために、カルシウムイオンやカリウムイオンなど様々なイオンを必要とするため、微生物が生

できる溶液(以下、単に「溶液」と呼ぶ)は電解液であることが必要である。このような電解液はイオンが電荷のキャリアの役割を担うため導電性を示し、電解液内部での電場と電流の関係は、流れる電流が微小な場合はオームの法則に従う⁵⁾。微生物の運動制御では微小電流しか流さないため、この条件は成立すると考えてよい。

導電体内部に電位分布を生成するためには、内部に電流を流すことが必要になる。そのため、溶液に電極を接触させて外部電源からの電流が溶液中に流れるようにすることが必要になる。この時、電極と溶液が接する場所では、金属原子中の電子と溶液中のイオンとの間で電荷の授受が起こり、電流のキャリアの変換されるといった特殊な現象が発生する。

溶液中のイオンと電極中の電子が電荷の授受を行うには大きなエネルギーが必要になるため、電極と溶液間の電位差が少ないとき(< 1V程度)は電極と溶液間に電流は流れない。この時は、電極の電荷を打ち消すように、溶液中のイオンの一部がそれと逆符号の電極の方に移動する^{5,6)}。そしてすぐに溶液と電極の界面(以下、「界面」と呼ぶ)で、電極表面の電荷と逆符号のイオンの電荷が同量ずつ対向し、コンデンサとしての性質を示す。界面は非常に微小な領域なので、ここには大きな電場が発生する。

電極と溶液間の電位差がある閾値以上大きくなると、界面の電場が非常に強くなり、その電場のエネルギーを利用して溶液中のイオンと電極中の電子との間で電荷の授受が発生する。このとき、一般には電極と溶液中の物質の化学的な反応を伴う。電荷の授受が発生するための電位差の閾値は、電極の材質・溶液内のイオン組成・温度などの周位環境に依存し、その予測は困難であることが多い。

溶液と電極の界面では複雑な現象が存在し、電極に印加する電位と溶液中の電位とはかならずしも一致しないことがわかる。

3. 電流制御手法の提案

3-1 電流制御手法の原理 これまで微生物の走電性による制御では、このような電解液と電極との間の複雑な関係は考慮されず、単に、各電極にどれだけの電位を印加したかだけについて考慮することが多かった。例えば、伊東はその報告の中で、

各電極の電位を一定に保ち、

$$(\text{溶液中の電位勾配}) = \frac{(\text{電極への印加電圧})}{(\text{電極間隔})} \quad (1)$$

としていた⁴⁾。このように各電極の電位を一定に保ち溶液中の電位分布の形を制御する手法を、今回われわれが提案する手法と区別するために、電位制御手法と呼ぶこととする。

しかし、(1)式は界面での電位差を考慮に入れていないため、溶液中の電位勾配を正確に表せていないことがわかる。そのため、電位制御手法では溶液中の電位勾配の形を正確に制御することは難しく、この手法を用いて微生物の運動を定量的に評価することは困難である。

そこで、本論文ではこの問題を解決する電流制御手法を提案する。溶液は普通の導電体とみなせるので、各電極を流れる電流がわかれば溶液中に生成される電流分布や電位分布を定量的に見積もることが可能となるはずである。提案手法は、このことを利用して、溶液に接している各電極に流れる電流を制御することにより溶液中の電位分布の形を制御する手法である。

具体的には、次の手順で電位分布を生成する。

1. 電極の配置と溶液をいれる容器の形状に基づいて、理論的、もしくは有限要素法などの数値的手法により、希望する電位分布を作成する。ただし、生成可能な電位分布の形状は電極の配置と容器の形状に依存する。
2. 作成した電位分布から、各電極にどれだけの電流が流れるのかを理論的、もしくは数値的に求める。
3. 求めた電流が各電極に流れるように、各電極に印加する電圧を制御することで、目的とした電位分布を溶液中に生成する。

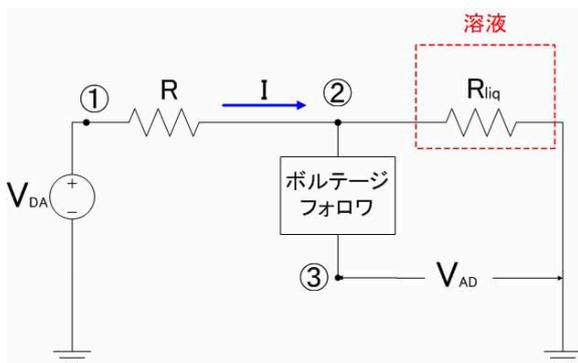


Fig. 3.1 電流制御のために用いた各電極の回路図

3-2 電流制御型電気刺激デバイス 走電性を利用して微生物を制御する場合、各電極に流す必要がある電流は数百～数千 μA と微量である。このような微量の電流制御をおこなうには特殊な電源が必要となる。しかし、微生物の運動制御のためには電極が4個以上必要となることが普通であり、すべての電極に特殊な電源を用意するのは現実的でない。特に、微生物の制御まで考えると、一般的な計算機から電極を直接制御できることが望ましい。そのため本研究では、Fig.3.1のような回路で構成される電流制御型電気刺激デバイスを用いた。

直流電圧源として一般的なD/Aボードを使用し(出力を $V_{DA}[\text{V}]$ とする)、電源からの出力の先に抵抗 $R[\Omega]$ をつなぎ、その先に溶液を入れた実験プール(抵抗を $R_{liq}[\Omega]$ とする)をつなぎ、グランドにつなげる。また、一般的なA/DボードによりFig.3.1中の点2における電位を測定する(入力を $V_{AD}[\text{V}]$ とする)。なお、A/Dボードへ電流が流れこまないように、A/Dボードの入力の前にボルテージフォロワを取り付けた。

こうすることで、電極から流入する電流 $I[\text{A}]$ は

$$I = \frac{V_{DA} - V_{AD}}{R} \quad (2)$$

となり、 $V_{DA} - V_{AD}$ が一定となるような制御を行えばよいということがわかる。そして R を適切に選ぶことで一般のD/Aボードでも微小電流の制御が可能となる。

4. 溶液中の2次元電位分布生成実験

電圧制御手法に対する電流制御手法の優位性を確認するために、同じ条件で溶液中に2次元な電位分布を生成し、実際に生成された電位分布を比較する実験を行った。

SASIP社の有限要素法による解析ソフトウェアANSYSを用い、溶液を抵抗板としてモデル化したシミュレーション結果を基にして、電圧制御・電流制御の両手法を用いて溶液中の電位分布の形を操作した。その際に溶液中の電位分布を測定することで、実際に両手法が溶液中にどれだけシミュレーション結果に忠実な電位分布を生成できるのかを調べた。

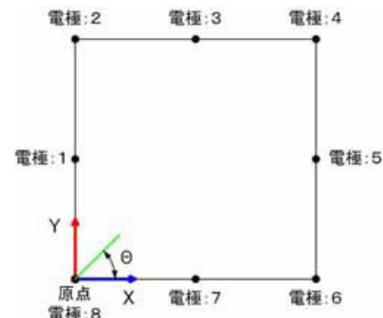
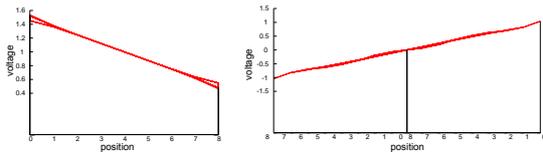


Fig. 4.1 想定する容器における原点・軸と電極番号

溶液をいれる容器は、縦・横ともに58mm、深さ44mmの直方体のプラスチック製の容器に、底面に垂直に接するように8本の電極を取り付けた物とした。各電極の位置は、正方形となっている容器の底面の各頂点と各辺の midpoint となっている。この実験では深さ方向には電位分布をほぼ一様と考え、実験プールを2次元な正方形として考える。Fig.4.1に示すように、正方形の一つの頂点を原点とし、原点で交わる2本の辺に並行にx軸・y軸をそれぞれ定義する。また、任意の直線とx軸のなす角度を θ ($-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 左回りを正とする)とする。また、図に示したとおり、各電極に1～8の番号を振り分ける。

4-1 目標とする電位分布 ANSYSを用いてFig.4.2に示した電位分布を作成し、これを実際に生成することを目的とした。今回の実験ではこのように、溶液中に $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ という二種類の方向に向き・大きさが異なる形の電位勾配の生成を目指した。



(a) $\theta = 0^\circ$ 方向の電位分布 (b) $\theta = 45^\circ$ 方向の電位分布

Fig. 4.2 抵抗板モデルのシミュレーション結果: (a) は X 軸に平行な視点でプロットしており, 横軸は測定点, 縦軸は電位 (単位: V) に対応している. (b) は $\theta = -45^\circ$ に平行な視点でプロットしている. 縦・横軸等は (a) と同様である.

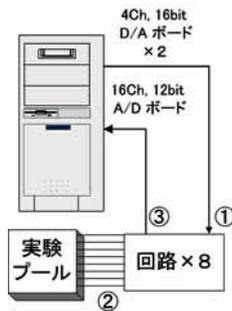


Fig. 4.3 電流制御のために用いた各電極の回路図

4-2 実験システム構成 溶液中の電位分布を制御するための実験システムを Fig.4.3 に示す. 図中の「回路」は Fig.3.1 に示した抵抗 R (本実験では $R = 100k\Omega$ とした) とポルテージフォロワを指す. なお, 図中の 1~3 は Fig.3.1 中の 1~3 に対応する. D/A ボードは Interface 社の PCI-3310 を, A/D ボードは Interface 社の PCI-3166 を使用した.

電極には, 電流印加の際に溶液中に金属イオンが溶け出し, ソウリムシの生理活性を損なう恐れがないよう, 炭素電極を使用した. なお, 今回の実験では炭素電極の代わりにシャープペンシルの芯 (4B, 0.5mm) を使用した. なお電極 8 のみは, Fig.3.1 の直流電源に当たる部分をグランドにすることで, 系全体の電流の捨て場とした.

溶液として, 実際にソウリムシを培養しているものと同様の溶液 (ミネラルウォーター「六甲の美味しい水」1ℓ に対し, きな粉 1g を溶かしたものを) を使用した.

この容器の個々の電極に次のように電圧, もしくは電流を与えた.

電圧制御手法の場合は制御目標値として, 実験プールの各電極に, ANSYS の抵抗板モデルの各電極に設定した電圧と同じ比率の適当な電位を印加した.

電流制御手法の場合は制御目標値として, ANSYS の解析結果から得られる, 各電極から流入した電流と同じ比率の適当な電流を各電極に印加した.

4-3 溶液中の電位分布の測定法 溶液中の電位分布の計測法として, 電気化学で広く行われている 3 電極方式を応用した^{7,8)}. 3 電極方式とは, Fig.4.4 に示すように, 3 つの電極を用いることで, そのうちの 1 つの電極の電位を測る方法である.

図中の参照電極と呼ばれる電極で溶液中の電位分布を測定する. 参照電極は, 電極-溶液の界面での電位降下が一定で変化しないものを選ぶ. 本実験では, 参照電極として銀-塩化銀電極を用いた.

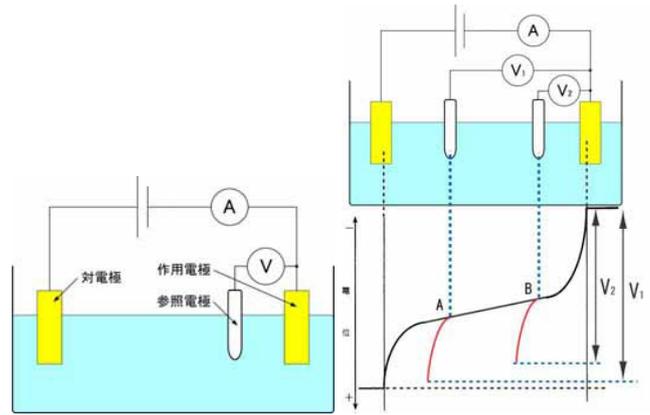
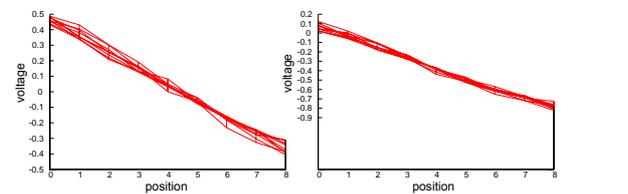


Fig. 4.4 3 電極方式

Fig. 4.5 電位分布の測定

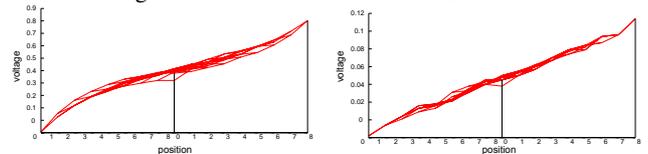
電位分布の計測法を Fig.4.5 を例に説明する. ある点 A での参照電極-作用電極間の電位差が V_1 であったとする. そして参照電極を移動し, その点 B での参照電極-作用電極間の電位差が V_2 であったとする. このとき, 赤い曲線で記した参照電極の電極-溶液の界面での電位降下は等しいため, その差をとると点 A・B 間の電位差となる. そのため, 参照電極を走査することにより溶液中の電位分布の形状を測定することが可能となる.

測定は等間隔に実験プール中の縦 $9 \times$ 横 9 の 81 点の電位を計測した. 走査の方法は, 参照電極をスタンドに固定し, それを手動で移動させて電位を測定した.



(a) 電圧制御時の電位分布 (b) 電流制御時の電位分布

Fig. 4.6 $\theta = 0^\circ$ 方向制御時の電位分布



(a) 電圧制御時の電位分布 (b) 電流制御時の電位分布

Fig. 4.7 $\theta = 45^\circ$ 方向制御時の電位分布

4-4 測定結果 Fig.4.6 に $\theta = 0^\circ$ 方向制御時の, そして Fig.4.7 に $\theta = 45^\circ$ 方向制御時の測定結果を示す. それぞれ (a): 電圧制御時の結果, (b): 電流制御時の結果となっている. Fig.4.6 は Fig.4.2(a) と同様に, Fig.4.7 は Fig.4.2(b) と同様にプロットしている. Fig.4.2 と Fig.4.6, Fig.4.7 を比較すると, 次のようなことがわかる.

電圧制御時には $\theta = 45^\circ$ 方向の電位分布を与えた時に特に周辺部の電位が歪んでいることがわかる. このことから, 電圧制御時にはあらかじめ作成した電位分布を生成できていないということがわかる.

それに対して電流制御時は, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ とともに溶液中に抵抗板モデルでのシミュレーション結果とほぼ相似の形の電位勾

配が得られた。このことから，電流制御時には市販の解析ソフトの抵抗板モデルを溶液中の電位分布のシミュレーションに適用することができるということがわかる。

以上の結果から，電流制御手法の有用性が示せた。

5. まとめ

本論文では，負の走電性を利用してゾウリムシの運動を制御する手法をより厳密に研究するために，より高い精度で溶液中の電位分布の制御が可能となる電流制御手法を提案した。次に，提案手法に基づいて開発した電流制御型電気刺激デバイスを説明し，そのデバイスを用いておこなった電位分布制御実験から，提案手法の有効性を示した。

この手法を利用することにより，溶液中の電位分布の形とゾウリムシの運動の関係の正確なモデル化の実現が期待できる。

参考文献

- 1) 尾川順子, 奥寛雅, 橋本浩一, 石川正俊. オーガナイズドバ イオモジュールの実現に向けたゾウリムシの応答計測. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演 論文集, pp. 2P2-3F-E3, 2003.
- 2) 内藤豊. 単細胞動物の行動 - その制御のしくみ. 東京大学 出版会, 1990.
- 3) Naoko Ogawa, Hiromasa Oku, Koichi Hashimoto, and Masatoshi Ishikawa. Motile Cell Galvanotaxis Control using High-Speed Tracking System. To appear in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2004.
- 4) Akitoshi Itoh. Motion Control of Protozoa for Bio MEMS. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 181-188, 2000.
- 5) 渡辺 正ほか. 基礎化学コース 電気化学. 丸善, 2001.
- 6) 喜多, 魚崎. 電気化学の基礎. 技報堂出版, 1983.
- 7) 藤嶋 昭ほか. 電気化学測定法 (上). 技報堂出版, 1983.
- 8) 電気化学会 (編). 電気化学測定マニュアル 基礎編. 丸善, 2002.