電場による原生動物の行動制御に関する研究*

(第2報, 小回り制御手法の開発と微小羽根車の駆動)

伊東明俊^{*1}, 小林琢^{*2}, 早乙女康典^{*3}Motion Control of Protozoa by Electrical Field
(2nd Report, Development of the Rapid Turning Method
and Actuation of Micro Impeller)Akitoshi ITOH^{*4}, Taku KOBAYASHI and Yasunori SAOTOME^{*4} Tokyo Denki University, Dept. of Mechanical Engineering,
2-2 Kanda, Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

This study investigates the possibility whether protozoa can be treated as a living micro manipulator/actuator or not. Motion control of protozoa was made by using the negative galvanotaxis. In the previous study, it was succeeded to control the paramecium along figure '8'. Its controllability, however, has problems about speed control, rapid turn and position accuracy. Therefore, this paper first investigates the application of pulse width modulation method for the control of paramecium's swimming speed. However, the results show that the application of the pulse electric field causes the strange reaction such as rotation, zigzag swimming, etc. Next, rapid stopping phenomenon of paramecium's swimming by the sudden stop of electrical field is investigated to improve the rapid turning ability of paramecium's swimming. To adopt this method to the automatic motion control program, paramecium can be controlled along any shaped guide route. Paramecium's generating force is also measured by pushing the small object by controlled paramecium. It is estimated about 2.7×10^{-8} N. For an example of the micro mechanical application, the micro impeller (ϕ 0.5 mm) is rotated by paramecium. These results show that micro mechano-bio-fusion system can be constructed by using protozoa.

Key Words: Micromachine, Manipulator, Biological Engineering, Micro Electro Mechanical System, Paramecium, Automatic Motion Control, Rapid Stopping Phenomenon, Force measurement, Intelligent Micro Actuator

1. 緒 言

現在, 機械工学の分野では, 生物を利用した機械システムの研究や, 生物と機械が融合したシステムの研究は, 人間の延命を目的とした医工学に関わる研究では多く見られるが, 新たな機械システムの創製を目的とした研究は非常に少ないのが現状である。

一方で, 他分野においては, 例えば化学の分野では, 有機化学や色々な薬品製造にみられるように, 生物由来の材料を使ったり, 生物自体を製造工程に組み入れなければ作れない物質が極めて多くある⁽¹⁾。また, 電子工学・計測工学の分野でも, 軽部らのバイオセンサー⁽²⁾の研究に代表されるような, 生体物質を電子回路系に組み入れた, 生体融合エレクトロニクスとでも言

うような研究がすでに展開されている。

筆者らは, 機械工学分野においても, このような生物と機械が融合したシステムの研究が展開されるべきではないかと考え, その手始めに, 原生動物の持つ負の走電性を利用して, 原生動物の行動を自在に制御し, マイクロマニピュレーションや, 微小機械の駆動などに応用することができないかについて, 検討を始めた。

前報⁽³⁾において, ゾウリムシ(*Paramecium caudatum*)について, 最初に直流電場に対する反応行動の基礎特性について調べた。その結果, 電場でゾウリムシの遊泳方向を制御することは可能であるが, 反応は ON-OFF 的であり, 電場の大きさなどにより遊泳速度を制御することは困難であることが明らかになった。

また, 深さ 0.2mm の 8 方向対抗電極付きの行動制御用プールと, そのプール内に任意の直流電場を発生させる実験システムを開発し, これを用いて, プール上部に設置した CCD カメラ画像をもとにオペレータが直流電場の方向を変えることで, ゾウリムシを任意の方向へ誘導制御すること, ゾウリムシを使ってゴミ

* 原稿受付 2000 年 4 月 10 日。

^{*1} 正員, 東京電機大学工学部(〒101-8457 千代田区神田錦町 2-2)。^{*2} 学生員, キヤノン(株)(〒146-8501)(元:東京電機大学大学院)。^{*3} 正員, 群馬大学工学部(〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。
E-mail: aito@cck.dendai.ac.jp

などの微小物体を動かすことに成功した。

また、CCD カメラ画像をもとに、コンピュータで画像処理からゾウリムシの位置と遊泳速度を算出し、それをもとにゾウリムシを自動誘導制御することも試みた。その結果、円や8の字など、曲率の大きな誘導経路に沿ってであれば、ゾウリムシの行動を自動制御することに成功した。

以上のように、ゾウリムシを電場で操ることにより、マイクロマニピュレーション等へ応用することが基本的に可能であることが明らかになると共に、自動制御により、ゾウリムシを作動素子として機械システムに組み込むことも可能であることが明らかになった。しかしながら、特に自動制御においては、誘導経路に角などの曲率半径の小さな箇所が含まれていると、ゾウリムシはオーバーランしてしまい、うまく誘導することができないことが明らかになった。

そこで、本報においては、ゾウリムシをどのような誘導経路に沿ってでも自動誘導制御を可能とするための制御技術の開発を目的に、最初に、印加電場をパルス幅変調制御することによりゾウリムシの遊泳速度を制御することが可能かどうかについて調べた⁽⁴⁾。次に、行動制御実験中に見いだした、電場の印加を突然停止したときに、ゾウリムシが遊泳を急停止する現象を調査し、その現象を小回り制御手法として自動制御プログラムに組み込んで利用することを試みた⁽⁵⁾。

また、ゾウリムシを機械的に利用する際に重要となるゾウリムシの発生力および出力を計測したうえで、デモンストレーションとして、ゾウリムシにより直径0.5mmの羽根車を駆動した⁽⁶⁾ので、以下、順に報告する。

2. 実験システム及び実験用原生動物

今回実験に用いたシステムは、基本的に前報⁽³⁾と同じものである。実験システムは、図1に示すように、パーソナルコンピュータ (IBM 互換機, P5-166) と8ビット18チャンネルのD/Aコンバータを利用して、プログラミングにより任意の電場を印加可能なシステムである。実験映像は200倍接写レンズ付きのCCDカメラ及び画像処理ボードを介して制御用コンピュータに取り込まれる。

実験用プールは、基礎特性の調査実験には、幅3mm、深さ2mm、電極間隔10mmの対向電極プールを用いた。行動制御実験には、図2に示す、4対の対向電極を備えた8角形プール (電極間隔4mm、深さ0.2mm) を用いた。電極の材質は、共に炭素である。

実験用原生動物も、前報同様の、大型の繊毛虫であ

るゾウリムシ (*Paramecium caudatum*) を用いた。ゾウリムシの体長は約200 μ mである。

Fig. 1 Block diagram of the experimental apparatus

Fig. 2 Structure of the experimental pool for motion control

3. パルス電場に対する反応行動の基礎特性

前報⁽⁴⁾において直流電場に対する反応行動の基礎特性を調べた結果、ゾウリムシの遊泳速度は、印加直流電位勾配が陰極に向かって泳ぎ出すしきい値を超えると、電位勾配を変化させてもあまり遊泳速度が変化しない、ON-OFF的な特性を示すことが明らかになった。この特性のため、ゾウリムシの行動を自動制御する際に、誘導経路に角などの急旋回が必要な箇所があると、ゾウリムシがオーバーランして経路をはずれてしまうため、自動制御を実現できていない。

これを改善し、ゾウリムシの遊泳速度を自在に制御するには、モーターの制御等に用いられている、しきい値を超える電圧のON-OFFを繰り返すパルス幅変調 (Pulse Width Modulation, 以下 PWM) 制御が有効ではないかと考えられる。そこで、本当に PWM 制御により遊泳速度を変化させることが可能かどうか、パルス電場に対する反応行動の基礎特性を調べてみた。

実験に使用したプールは、上述の対向二極炭素電極プールである。パルス電場の印加電位勾配は 0.6V/mm 一定とし、ON-OFF のデューティ比を変化させて実験を行った。直流電位勾配に対する反応行動と比較するため、パルス電場の時間平均値を相当電位勾配として下式から求め、結果を整理した。

$$E_{eq} = E_{on} R_{dt} \quad (1)$$

ここで、 E_{eq} は相当電位勾配 (V/mm)、 R_{dt} はパルスのデューティ比、 E_{on} は電場 ON 時の直流電位勾配 (V/mm) である。周波数を 5Hz から 5kHz まで変化させたときの遊泳速度の変化を調べた結果を図3に示す。各プロットは、それぞれ20例ずつ測定したものの平均値を示している。

パルス電場に対して、ゾウリムシは予想外の反応を示した。反応は周波数によって大きく異なった。先ず周波数が 5Hz のときは印加パルスの間隔にあわせて断続的に遊泳する。しかし、スムーズに遊泳できないため、横方向への振れ幅の大きい遊泳となった。 50Hz と 500Hz では相当電位勾配が 0.55V/mm 以下では、遊泳速度が0となっている。これは、電場に反応しないのではなく、パルス電場の印加と同時にゾウリムシがその場で回転を始めてしまうためである。周波数 5kHz での結果は、前報における直流電位に対する反応行動と、ほぼ同じ特性である。しかしながら、印加周波数 50kHz 、相当電位勾配 0.3V/mm の実験では、 2Hz 前後の周期で断続的な遊泳を行うようになった。

以上のように、パルス電場に対するゾウリムシの反応は大変複雑で、生理学的に興味深い結果が得られた。印加周波数により反応行動が一変する理由の詳細は不明であるが、内藤⁽⁷⁾によると、(1)負の走電性は、細胞膜の Ca^{2+} 電位感受性イオンチャンネルに由来し、繊毛運動機構の周りの Ca^{2+} イオン濃度により繊毛の有効打

の方向が一義的に決定されるものであること、(2)電場の印加を切ったときに、電場を印加しているときに生じている繊毛反応と逆向きの繊毛反応が一時的に生じること⁽⁸⁻⁹⁾、などが実験から明らかにされており、これが今回の反応に関連しているものと推察される。すなわち、パルス電場の印加は繊毛の運動方向をつねに正転・逆転と反転させ続ける結果となり、電場の印加開始時に負の走電性による繊毛の運動が始まるまでの時間、電場の印加停止時に逆向きの繊毛反応が起きる時間、それが終了する時間、細胞の上で繊毛が生えている方向、細胞の位置による電場に対する繊毛の反応活性の違いなどが複雑に相互作用して、上述のような反応行動が現れたものと予想される。

以上のように、行動制御の観点から見ると、PWM 制御によりゾウリムシの遊泳速度の制御を行うのは困難であることが、今回の実験より明らかになった。しかしながら、 $50\sim 500\text{Hz}$ で観察されたその場での回転は、その場回転を続けさせることによりゾウリムシの行動をある地点で停止させ続けるなど、制御手法の特殊な応用例として利用できる可能性があり、今後検討すべき課題である。

4. 遊泳の急停止現象の基礎特性と、それによる急旋回時の経路誤差の改善

4.1 電場の印加停止に伴う遊泳の急停止現象の基礎特性 ゾウリムシは、電場を切り替えることにより方向転換を行うと、慣性などの影響により急激な方向転換ができない。実際に前報⁽⁹⁾において試作した自動制御プログラムでは、円や8の字など、急激な方向転換を含まない経路に沿ってしか行動の自動制御を行うことができなかった。

しかし一方で、ゾウリムシを電場で制御しているときに、電場を急に消失させるとゾウリムシがその場で一時停止する現象が確認できる。オペレータがマニュアル制御を行うときは、無意識のうちにこの現象を利用している。このことは、上述の内藤らの言う電場の印加を切ったときに、電場を印加しているときに生じている繊毛反応と逆向きの繊毛反応が一時的に生じる現象による結果であると考えられる。そこで本研究では、この現象を積極的に利用して、急激な方向転換時に遊泳を一度停止させることにより、経路誤差の改善を計ることとし、最初にそのための基礎データの測定を行った。

実験は図2の8方向対抗電極プールにて行った。その際の実験方法は、最初に一对の対抗電極間のみに直流電場を印加しておき、プール内のゾウリムシを、陰

Fig.3 Effect of pulse electrical field on the swimming speed of paramecium

極の回りに集めておく。この状態から、印加している電場の極性を反転させると、対抗電極の反対側へ移った陰極に向かって、ゾウリムシは一斉に泳ぎ出す。ゾウリムシが、電極と電極の中間付近にまで泳いできたときに、電場の印加を急に停止する。その時の、停止前の印加電位勾配に対する、電場を急に消失させたあとのゾウリムシの停止時間と、陰極の方向に遊泳していたゾウリムシの内その場で停止したゾウリムシの割合（これを停止反応率とする）を測定した。結果を図4に示す。各プロットは、それぞれの条件で50例について測定した結果から求めたものである。この図から、電位勾配が高くなるにつれ停止時間が徐々に長くなり、停止反応率の方は0.6V/mm付近でほぼ100%となっていることがわかる。よって電場消失によってゾウリムシを確実に停止させるには、その前に0.6V/mm以上の電位勾配を印加しておく必要があることが明らかになった。またその時の停止時間は、0.2~0.3sであり、それ以上時間が経過すると、ゾウリムシは、徐々に動き出し、時間経過とともに自由に遊泳する状態に戻っていく。

Fig.4 Relationship between rate of stopping paramecia and applied electrical potential gradient

4. 2 ゾウリムシの方向転換時における遊泳の急停止現象の利用 以上の結果を踏まえて、次に、上の実験で電場の印加を停止させた後、設定時間が経過してから直角方向へ電場を切り替え、ゾウリムシがどの程度電場の方向に忠実に行動するかを電場の停止時間をパラメータとして比較してみた。印加する電位勾配は上述の実験結果より約0.7V/mmとして、電場消失を行わない場合および消失時間を0.2~1.0秒の間で変化させたときの、方向転換開始時からの誘導経路を測定した。図5に結果の一例を示す。また、これらの結果より誘導経路（電場の方向）と実際の経路との偏差

Fig.5 Changes of the paramecium's swimming route by the stopping time of electrical field

Fig.6 Relationship between stopping time of electrical field and deflection area from the target course

面積を求め、比較した結果を図6に示す。これは、図5の実験を、各条件で20回ずつ行い、まとめた結果である。これより電場の消失時間が0.6s以下であれば、電場消失を行わない場合よりも電場を消失させてから電場の方向を切り替える方が、偏差面積が1/3程度に小さくなり、制御特性をかなり改善できることが明らかになった。消失時間が0.6秒を超えるとゾウリムシが自由な方向への遊泳を開始するため偏差面積が大きくなってしまふ。以上の実験から、ゾウリムシを急旋回させて誘導する際は、0.6V/mm以上の電位勾配を印加し、電場を0.2~0.6秒消失させてから電場を切り替えることにより誘導経路との誤差を改善できることが明らかになった。

4. 3 遊泳の急停止を組み込んだ遊泳方向の急旋回制御手法の開発 以上の制御手法を、前報⁽³⁾において開発した、ファジィ制御プログラムに組み込み、誘導経路上で急旋回が要求される箇所では、必ずその前の電位勾配を0.6V/mm以上に高めた上で電場の印加を0.5s停止するように、適応的に制御するプログラム

に改良した。電場の印加停止は、目標経路の角度変化が 120deg 以下のときに、経路近傍（ファジィ論理で判断）に入ると判断したときに印加停止を行う。このプログラムを用いて、急旋回箇所を多く含む星型経路に沿ってゾウリムシを自動誘導制御することを試みた。結果を図7に示す。(a)は、実際にプールを上方から観察したビデオ画像をもとに約0.5秒ごとの画像を合成した写真であり、(b)は、その際に、誘導制御しているパソコン上のモニタ画面の誘導軌跡である。位置決め精度はかなり悪いものの、星形経路に沿ってゾウリムシが遊泳していることが判る。

以上のように、本研究で開発したプログラムによって、ゾウリムシを急旋回を含む経路に沿って自動制御することに初めて成功した。このことは、任意の誘導経路に沿って、ゾウリムシを誘導可能であることを示すものである。なお、本方式では、遊泳の急停止を確実に発生させるため、どうしても印加する電位勾配が前報における制御方式(0.2-0.3V/mm)より大きくなってしまい、そのため、螺旋に旋回しながら泳ぐゾウリムシの螺旋の振れ幅がより大きくなってしまい、これが誘導経路からのずれ幅を大きくしている。この点を今後改良していく必要がある。

Fig.7 An example of the automatic control experiment with rapid turning method. Paramecium swims along star-shaped target course

5. ゾウリムシの発生力測定と、小型羽根車の駆動

5.1 発生力および出力の測定実験 以上、ゾウリムシを任意の経路に沿って自動誘導制御することが可能となったわけであるが、ゾウリムシをマイクロマニピュレータやMEMS用のインテリジェントアクチュエータとして機械的に利用することを考えると、システム設計のためにゾウリムシの発生力を見積もることが必要になる。そこで、以下にゾウリムシの力及び出力を実験的に求めてみた。

実験は、自動制御実験と同じ図2のプールを用いて行った。実験方法としては、プール内に一匹のゾウリ

ムシを入れ、オペレータが実験映像を見ながらジョイスティックを使ってゾウリムシの行動を手動制御する。この方法で、ゾウリムシにより、熱可塑性樹脂製の微小球体を搬送させる実験を行う。そのときの実験映像より微小物体の搬送速度を求め、それから力および出力を計算する。なお、求める力や出力は、搬送物体の大きさにより変化すると考えられるため、様々な大きさの搬送物体をゾウリムシに搬送させる実験を繰り返した。搬送物体の大きさは、小さい方はゾウリムシをコントロールして搬送物体に当てる作業の難易度から制限され、大きい方はゾウリムシが搬送物体との衝突時に回避反応（ゾウリムシが壁などにぶつかったとき、ある距離を後退して泳ぎ、そこで体を振って進行方向を変更してから、再び前進する行動）を起こすかどうかによって制限される。今回の実験では、直径 170-410 μm の範囲で実験を行った。

なお、手動制御時に印加する電位勾配は、ジョイスティックを最大に傾けたとき 0.68V/mm になるようにし、スティック角度に比例した大きさの電位勾配が印加されるように設定した。

力および出力の計算は、粘性と質量のみを考慮して計算した。

ゾウリムシが運搬できる大きさの球体の移動時のレイノルズ数は、約 10^{-6} - 10^{-7} のオーダーであると考えられるため、球体を押す力は、下式より算出した。

$$F = 3\pi d\mu U + Vg(\rho_p - \rho_w) \quad (2)$$

ただし、 d は球の直径、 μ は動粘度、 U は球体の移動速度、 V は球の体積、 g は重力加速度、 ρ_p は球体の密度、 ρ_w は溶液の密度である。ここで、 $\mu = 8.9 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 、 $\rho_p = 1100 \text{kg/m}^3$ 、 $\rho_w = 1000 \text{kg/m}^3$ とした。

また、出力は、下式より算出した。

$$W = F U \quad (3)$$

以上より、実験映像より、球の直径、球体の移動速度を求め、ゾウリムシの力・出力を算出した。

実験の結果、ゾウリムシは、球体に衝突したとき、球体の大きさがある大きさ以下の場合には、球体を引っかけた状態で前方に遊泳するが、それ以上の大きさになると、球体に衝突したときに回避反応を起こすことが明らかになった。

図8は、搬送した微小球体の直径と、ゾウリムシの発生する力との関係を示したものである。ゾウリムシは、搬送物体が小さいときは、遊泳するのに必要以上の力を出さず余力を残しているものと考えられる。そのため、搬送物体が大きいほど、大きな力を発生している。図8のx軸380 μm 前後に縦に入っている破線は、回避反応を起こすようになる球体の直径の平均

Fig. 8 Relationship between Paramecium's generating force and diameter of the transported micro sphere. Paramecium can not move the sphere larger than 370 μm . Therefore, generating force is estimated as about $2.7 \times 10^{-8} \text{ N}$

値, すなわち搬送限界である. すなわち, 図8の曲線と破線の交点付近が, ゾウリムシの発生する最大力と考えられ, 発生力を $2.7 \times 10^{-8} \text{ N}$ 前後と見積もることができた.

この測定値を, 過去の研究⁽¹⁰⁾と比較すると, 同じ種である *P. caudatum* で $3.0 \times 10^{-9} \text{ N}$ と算出されており, オーダーはほぼ同じであるが, 我々の測定値の方が大きく算出されている. この理由としては, 本実験では電場により遊泳を強制しているため, 自由遊泳状態の測定結果よりも, 測定に伴う遊泳方向の転換や回避反応などを起こしにくく, ゾウリムシが出せる力の限界付近まで測定できるためであると考えられる.

出力として算出した場合, 力のようにきれいな傾向はみられずデータは大きくばらつく. これは, 測定した物体 (= ゾウリムシ) の移動速度が大きくばらついているためである. 図9が測定結果を示したものであるが, 算出値は, ほぼ 10^{-12} W のオーダーであること

Fig. 9 Relationship between Paramecium's generating power and diameter of the transported micro sphere.

が明らかになった. この値自体は, ゾウリムシの単体での遊泳速度 ($0 \sim 2.0 \text{ mm/s}$) を考えると, オーダーとしては妥当な値であると考えられる.

今回の測定方法では, 最大発生力を測定するには, 回避反応を起こさない範囲で最大の搬送物体の大きさを求める必要がある. そのため, 個々のゾウリムシの最大発生力を測定するには, そのゾウリムシ個体について, 搬送できる物体の大きさの限界を求めるまで複数回の実験を行う必要がある. しかしながら, この搬送実験を一度行うと, 溶液の pH 変化などによりゾウリムシの生理活性が低下してしまうため, 複数回の実験を繰り返すことはできない. よって, ゾウリムシ各個体の最大発生力を測定することはできなかった.

5. 2 微小羽根車の駆動

次に, ゾウリムシを実際にマイクロマニピュレータやインテリジェントアクチュエータとして機械的に利用することが可能なことを実証するために, 微小羽根車をゾウリムシにより駆動させることを試みた.

今回実験に用いた羽根車は, 厚さ 0.18 mm のポリイミドフィルムをエキシマレーザー微細加工装置により加工して製作したものである. 直径は 0.5 mm と 1 mm のものを用意した.

実験方法は, 最初に上述の電極間隔 4 mm の4対の対抗電極付きプール内にゾウリムシを入れておき, そこに, 羽根車を表面張力により浮かべた状態で入れる. この状態で, オペレータの手動制御により, ゾウリムシの行動を制御し, ゾウリムシにより羽根車を押して回転させたものである.

実験の結果, 直径 1 mm のものではゾウリムシは回避反応を起こし, 羽根車を回転させることはできなかったが, 直径 0.5 mm のものに関しては, 図10に示

Fig. 10 An example of the micro actuation experiment. Paramecium rotates the micro impeller.

すように、約4.5秒かけて羽根車を約一回転させることに成功した。この結果は、微小電子機械システム(MEMS)の駆動にゾウリムシを利用可能なこと、すなわちバイオ MEMS システムの構築が可能なことを示すものである。

6. 結 言

本研究により、ゾウリムシの任意形状の誘導経路に沿って自動誘導制御する技術の開発に成功した。また、手動制御ではあるが、ゾウリムシを用いて、直径0.5mmの微小羽根車を回転させることに成功した。以上の結果から、原生動物と MEMS、コンピュータを融合した、バイオ MEMS システムの実現が、十分可能であることが明らかになった。

今後、微小物体や微小機械部品など、ゾウリムシを用いて操作・駆動すべき物体が環境内に存在している場合においても、ゾウリムシと物体双方の位置・姿勢を自動認識し、ゾウリムシをマイクロマニピュレータとして自在に操る制御手法を開発する必要がある。また、ゾウリムシ以外の他の原生動物への本手法の適用、特に小型原生動物への適用を試みるのが今後の課題としてあげられる。

なお、本論文投稿後に、1991年の時点で本研究と同様の着想の研究が実施されていたことを研究者本人からの連絡により教えられた⁽¹¹⁾。この先駆的業績に敬意を表するとともに、「本研究と同じ発想の研究は筆者の知る限り見あたらない」とした前報⁽³⁾の記述を訂正させていただく。ちなみに、この研究では、回避反応の問題を解決できず、ゾウリムシにより物体を操作することができなかったため、現在は撤退しているとのこ

とである。筆者は、彼らの研究がうまくいかなかった原因として、行動制御用のプールに設置した電極の形状・形式に問題があり、プール内に均一な電場をうまく発生できなかったためであろうと推測している。

謝 辞

本研究を行うに当たり、原生動物の飼育方法などをご教授いただいた、東京大学神谷律教授、培養設備等に関する知見を教授いただいた早稲田大学三輪敬之教授に、深甚なる感謝の意を表する。また、本研究は、卒業研究として以下の3名の学生、斉藤正浩、芝正浩、大橋隆弘の諸君と共に行ったものであり、深く謝意を表わす。

文 献

- (1) 例えば、筏英之，“百万人の化学史”アグネ承風社，(1989)，121
- (2) 軽部征夫，“バイオエレクトロニクスの未来”，NTT出版，(1992)
- (3) 伊東明俊，機論，C編，65，631，(1999)，1078-1084
- (4) 1997年度精密工学会春季大会論文集，(1997)，1317-1318
- (5) 伊東明俊，第75期機論，(1)，(1998)，77-78
- (6) 小林琢，伊東明俊，日本機械学会バイオエンジニアリング秋季大会講演会，講演論文集，(1999)，69-70
- (7) 内藤豊，“単細胞生物の行動”，東京大学出版会，(1990)，77
- (8) Okajima, A., Japan J. Zool., 11, (1953), 87
- (9) Naitoh, Y., Annot. Zool. Japan, 31, (1958), 57
- (10) Saitoh, M., Izumida S., Hirota J., Appl. Phys. Lett., 71, 14, (1997), 1909-1911.
- (11) Fearing, R.S., 2nd Int. Symp. on Micromachines and Human Sciences, (1991), 1-15