

Cytoplasmic Streaming in Ameba

○國眼陽子（東洋大），望月修（東洋大）

Yoko KOKUGAN* and Osamu MOCHIZUKI*

*Department of Mechanical Engineering, Toyo University

Kujirai 2100, Kawagoe 350-8585, Japan

A motion of an ameba moving by crawling over a surface was investigated in order to apply it to a micro soft robot. An ameba was observed by using a high-powered microscope. For cytoplasmic streaming in ameba, granular materials with a diameter of $1.5\ \mu\text{m}$ in ameba were traced by a micro PTV measurement instead of injection of micro particles. Change in velocity vector distribution in ameba was obtained in every $1/30$ second. Ratios of influx to efflux of several parts in ameba were estimated. Maximum velocity of cytoplasmic flowing into a stretching pseudopodia was found to be 4 times larger than the stretching speed. Cytoplasmic flow rates of inflow and outflow in the all tested parts were unbalanced.

1. まえがき

低侵襲医療や日常検査のためのマイクロ医療機器の開発が望まれている。とくに自走式のマイクロロボットの実現は、従来の大型設備や特殊装置の必要性をなくし、医療をより身近で快適なものに変えるものとして期待されている。自走式のマイクロロボットの開発には、微小で高効率な動力源が不可欠である。そこで注目したのが微生物であるアメーバの運動である。アメーバはゾル・ゲル変換を行いながら運動する際に、自らの体内で化学反応を起こし、そこで生じたエネルギーを源にしている。一般に生体細胞中で生じるこのエネルギー効率はおおよそ 85% と高効率である。

本研究では、原形質の運動を可視化することにより、アメーバの運動と原形質流動との関連性を明らかにした。

2. 実験および実験装置

アメーバの原形質流動を可視化するために、倍率を 450 倍から 3000 倍に変えられる光学顕微鏡を用いた。撮影された細胞内部の原形質の移動から原形質の移動速度を求め、アメーバの仮足先端の移動速度と比較した。

実験対象はアメーバ・プロテウス（約 $300\ \mu\text{m}$ ）である。アメーバ・プロテウスは 20°C に管理したインキュベータ内で、KCM 溶液を培養液としキロモナスを餌として培養したものである。アメーバの一個体をマイクロピペットで抽出し培養液ごとプレパラートにのせ、その上からカバーガラスをかぶせ試験片とした。これにより、三次元であるアメーバの体を平面状にし、奥行き方向の運動を押さえ込

み平面内の運動を観察しやすいようにした。原形質の流動を倍率 1000 倍に設定された光学顕微鏡にて観察し、その様子を CCD カメラにてビデオ撮影した。

原形質の速度計測には原形質内の高比重顆粒（約 $1.5\ \mu$ ）をトレーサー用パーティクルとして利用した。高比重顆粒は写真では黒い点として写っている。それがフレーム間に移動する距離を PTV ソフトにより求め速度を算出した。原形質の粘性や粒子のブラウン運動があるため、粒子の運動が原形質の流れそのものということには必ずしもならないが、現時点では高比重顆粒の運動を原形質の流動と見なしている。外皮の速度計測は、ビデオ映像の数フレーム間の増加面積 ΔV を仮足の幅で割り平均速度を求めた。

3. 実験結果および考察

アメーバは仮足とよばれる細い線状の突起の伸縮動作により周囲を探索し、進む方向の仮足を基板に接着させ、そこを支点に全身を引きずるように移動する。アメーバの 1 分間におけるマクロ的運動の様子を図 1 に示す。写真は左上から右下に向って 20 秒ごとに倍率 450 倍で撮影されたものである。観察はじめにおいてこのアメーバは 8 ないし 9 つの仮足をだしている。1 分間という短い時間に、このアメーバはかなり活発に運動しその姿を変化させ、仮足の数が増加していく様子が観察された。すなわち、アメーバ内部に短時間に強さおよび方向が変化する原形質流動があることを示唆している。

アメーバ内部に生じる原形質流動を観察するために、アメーバの一

部を1000倍に拡大撮影した。その映像から高比重顆粒の速度ベクトルを求めた結果を図2に示す。なお、図2における高比重顆粒から伸びる矢印は速度ベクトルの方向のみを表している。たとえば、領域1に着目すると、太い矢印で示すように3つの流入と2つの流出が見られる。それらの流量を求めた結果を表1に示す。領域1において流入と流出の各流量はバランスしていないことが分かる。同様に伸びる仮足の根元に相当する領域2では2つの流入と1つの流出が見られる。この領域においては表1からわかるように流入量に対する流出量の比は4倍ある。仮足が縮む領域3においては流出するのみである。このような流量のアンバランスが起こる原因についてはゾル・ゲル変換に起因すると考えられるが現時点では不明である。

仮足先端の伸びる速度と、原形質のその仮足への流入速度との関連を調べるために、1本の仮足をクローズアップ撮影した。その結果を図3に示す。PTVで求めた速度ベクトルから仮足内の流速分布を求めた。図3に示した線上の速度分布を図4に示す。これより、この仮足における原形質の最大流入速度は $39.4 \mu\text{m/s}$ であり、

Table 1 Flow rate of testing region in ameba

領域	流入 ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)	流出 ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)
1	907.1	655.3
2	4002.5	1169

平均速度は $10.2 \mu\text{m/s}$ であった。これに対し、仮足先端の伸長速度の最大値は $9.6 \mu\text{m/s}$ であり、平均速度は $4.0 \mu\text{m/s}$ であった。したがって、原形質の流入最大速度に対し仮足先端の伸長速度の最大値は約1/4であることがわかる。

4. 結論

アメーバ内部に短時間に強さおよび方向が変化する原形質流動があり、それらの流入流量と流出流量はつりあっていない。原形質流動の速度分布は一様分布ではなく中央が速い放物型分布である。原形質の仮足への流入速度は仮足先端の伸長速度より速い。

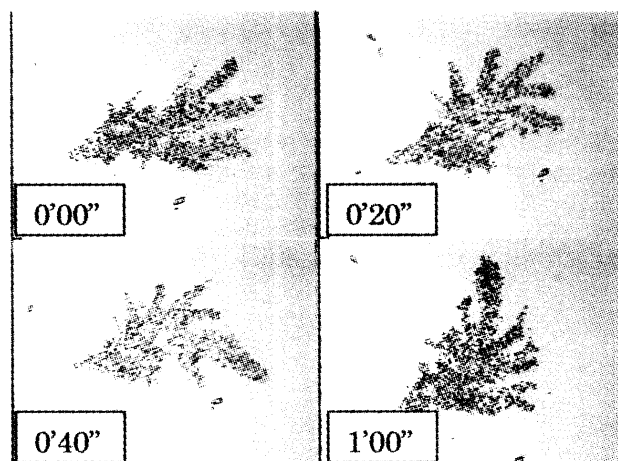


Fig. 1 Change in shape of ameba in every 20 seconds

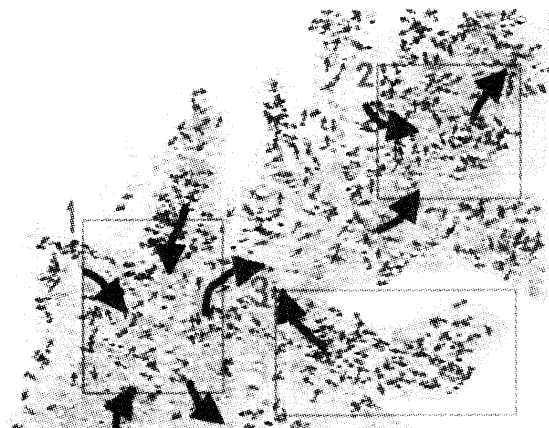


Fig. 2 Influx and efflux of testing region

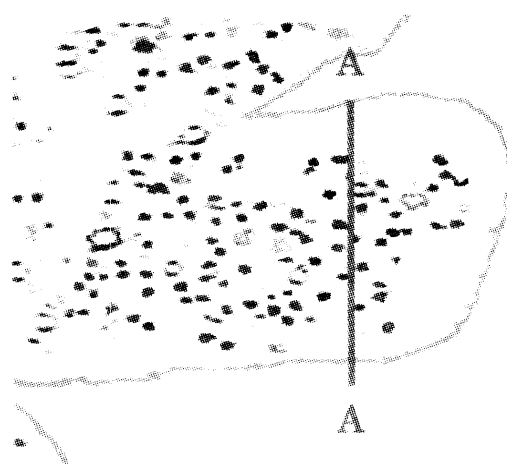


Fig.3 Close-up of pseudopodia and measuring position of velocity distribution

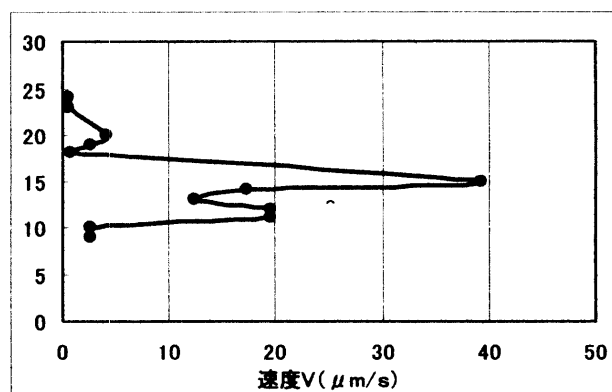


Fig.4 Velocity distribution at position A-A