

生物運動系にみる動的自己組織化：収縮・振動・回転

(早稲田大学・理工学術院・物理学科) 石渡 信一

【はじめに】

生物運動系には様々な運動様式が存在する。筋収縮系は収縮と振動、細胞分裂を担う紡錘体は分裂、植物細胞は流動、そして非筋細胞の細胞質には回転流動が見られる。これらの運動は、通常 ATP (アデノシン 3 リン酸) の加水分解に伴う化学エネルギーを使う能動的なものであり、動的な自己組織化の現れである。本講演では、筋収縮系にみられる自発的振動収縮 (SPOC) 現象と、それを説明するモデルについて、そして、人工細胞系 (油中液滴やリポソーム) に封入した細胞骨格・分子モーター系の動態について紹介する。

【結果と考察】

1) SPOC とは：現象とモデル

横紋筋 (骨格筋、心筋) 収縮系は、 Ca^{2+} 濃度が $1 \mu\text{M}$ 以上か以下かで収縮と弛緩の 2 状態が制御されると言われる。ところが、 Ca^{2+} 濃度を $1 \mu\text{M}$ 付近に固定すると、自発的な振動が始まる。これは、 Ca^{2+} 濃度に限らず、ADP 濃度や無機リン酸 (Pi) 濃度を調整し、収縮と弛緩の中間活性化条件に設定すると普遍的に発生する動的状態である。とくに心筋収縮系は、骨格筋収縮系と比べて圧倒的にこの SPOC 状態を取りやすい。では、この振動特性は心拍の基盤として機能してはいないだろうか。面白いことに、ラット、ウサギ、イヌ、ブタ、ウシなどの異なる心拍をもつ動物から取り出した心筋収縮系の SPOC 周期が、動物の静止心拍とほぼ線形の相関を持つことが分かっている[1]。我々はこの現象を説明するモデルを構築した。横紋筋の単位構造であるサルコメア (筋節) の長さ振動 (素早い伸長相と、ゆっくりとした短縮相からなる鋸波形) を説明しうる“単位モデル” [2]、続いてこれを直列に連結し筋原線維に見られる様々な SPOC 波を説明しうる“連結モデル”である[3]。

2) ミクロ空間中での細胞骨格・分子モーターの動態

油中で形成した $5-10 \mu\text{m}$ の球形液滴の中に、精製アクチンフィラメントを加え、適当な条件にすると、液滴の赤道面にアクチン束ができた。そこにミオシン分子の一部である HMM と ATP を加えておくと、アクチン束が収縮環のように収縮することも見出された[4]。Xenopus (アフリカツメガエル) 卵抽出液を封入すると、非筋細胞に見られる流動パターンが再現された (未発表)。様々な細胞運動様式は、比較的単純な物理で理解できるかもしれない。

【参考文献】

- (1) Ishiwata, S., Shimamoto, Y. and Fukuda, N. “Contractile system of muscle as an auto-oscillator.” *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **105**, 187-198 (2011).
- (2) Sato, K., Kuramoto, Y., Ohtaki, M., Shimamoto, Y. and Ishiwata, S. “Locally and globally coupled oscillators in muscle.” *Phys. Rev. Lett.* **111**, 108104 (2013).
- (3) Sato, K., Ohtaki, M., Shimamoto, Y. and Ishiwata, S. “A theory on auto-oscillation and contraction in striated muscle.” *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **105**, 199-207 (2011).
- (4) Miyazaki, M. et al. “In vitro self-assembly and contraction of actomyosin rings inside a cell-sized droplet.” 日本生物物理学会第 52 回年会 (札幌) (2014.9.25) など. (論文改訂中、及び準備中)