

非線形ダイナミックスで遊ぶ：ソフトマターの時空構造

京大理 吉川研一

§ 1. 細胞サイズの世界

私たちが、命あるものと、無生物を見分けるときには、時間軸上の事象を指標とすることが多い。心臓細胞の拍動、細胞分裂のリズム、神経細胞の発火、日周性のリズム（サーカディアン・リズム）などなど、いずれも“生きもの”らしさを、感じさせてくれる。ところで、このような生命のリズムの特質とは何であろうか？あるいは、生命の基本単位である細胞、この細胞を特徴づける μm のスケールには、なにか特別な意味があるのであろうか？

$\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールのソフトマターの物性の記述には、GL(ギンツブルグーランダウ)の描像が有効である。生物を含む多くの自然現象は、非保存系であるので、時間軸上の変化の特徴は、次のような時間依存性の GL 方程式で表すことができる。 $\partial\eta/\partial t \sim -\partial F/\partial\eta$ 右辺は、秩序パラメータ η の滑らかで連続的な関数であるので、初期条件を η_0 としたとき、その未来に η_0 の値を再びとることはできない。すなわち、リズムを生み出すような現象は生じえない。これは、 $\text{cm}\sim\text{m}$ スケールのマクロな世界との大きな違いである。マクロな世界では、Newton の運動方程式により、時間の二階微分がいきなり出てくるので、リズム運動は簡単に生じる（単一の変数で記述される運動方程式の相空間の次元が2となる）。秩序パラメータ η を複数の変数で記述すると、相空間の次元も2以上となり、リズムが生じてよいが、 $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールでは、散逸の効果が大きい（[粘性項]>[慣性項]）、持続的なリズム（軌道安定なリズム運動）とはならない。一方、マクロな系では、慣性項が粘性項よりも大きくなるため、第ゼロ近似として、非減衰型の調和振動を取ることが可能となる。しかしながら、このようなリズムは不可避免的に軌道不安定であり、摂動が与えられると、軌道も変化してしまう。また、サブ nm の世界では、量子論的特質が顕在化するが、原子間振動などでは、断熱近似が良い精度で成り立つために、調和振動的な描像が有効であることが多い。それに反して、 $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールの世界は、散逸が大きいために、非平衡開放条件が、持続的なリズムが起こるための必須の条件となる。

エネルギーや物質(mass)の“流れ”の中に置かれた、 $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールの世界で見られるリズム現象には、散逸系ならではの性質がある。軌道安定性、分岐現象、引き込み同調などの非線形振動子としての特質を、生物のリズムに見出すことができる。

生物リズムは一般にリミットサイクル振動であり、少数の自由度でもって運動を特徴づけることができる。細胞スケールは、極めて大きな自由度のシステムである。大自由度系が少数自由度の運動に縮約されることを、Haken は隷属原理(slaving principle)と呼んだ。極めて多数の速い変数が、断熱的に縮約され、 $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールでの、遅い(ms~day)自由度の運動が生じるが、この遅い運動モードは、必然的に強い非線形性を示すようになる。

要約すると、非平衡開放条件下におかれた $\text{nm}\sim\mu\text{m}$ スケールの世界では、少数の自由度で記述可能な、遅い運動のモードが出現し、その遅い運動のモードはその強度の非線形性ゆ

えに、システム全体に及ぶ集団運動となりえる。これが、今回の発表のサブタイトルにある、“ソフトマターの時空構造”の意味するところである。

細胞のリズムは、極めて複雑であるので、それをそのまま観察しても、システムの特性を理解することは困難である。一方、細胞を分解して、個々の部品であるタンパクやDNAなどの構造を詳細に調べても、部品のレベルでは、システムの特性がすでに失われているために、細胞のリズムや生きているメカニズムの本質に触れることは絶望的である。

そこで、“おもちゃ”で遊ぶ意味が出てくる。ここでは、ブラックボックスの無い、極めて簡単な“おもちゃ”の研究のたぐいを紹介したい。その方法論は、光により、ミクロな世界を、制御可能な非平衡開放条件におき、そこで生じる時空間の現象を、見て、調べて、遊ぶということである。

§ 2. ミクロな蒸気機関

図1は、水滴の生成—成長—消滅のリズム運動の実験の模式図であり、図2には実際の観測結果を示す。このように、過飽和蒸気の雰囲気の中で、水滴は軌道安定なリズムを刻むことができる。(当研究室の市川の研究)

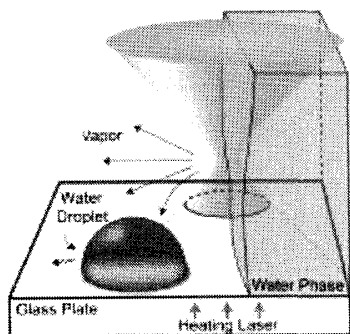


図1 水滴のリズム運動の観察

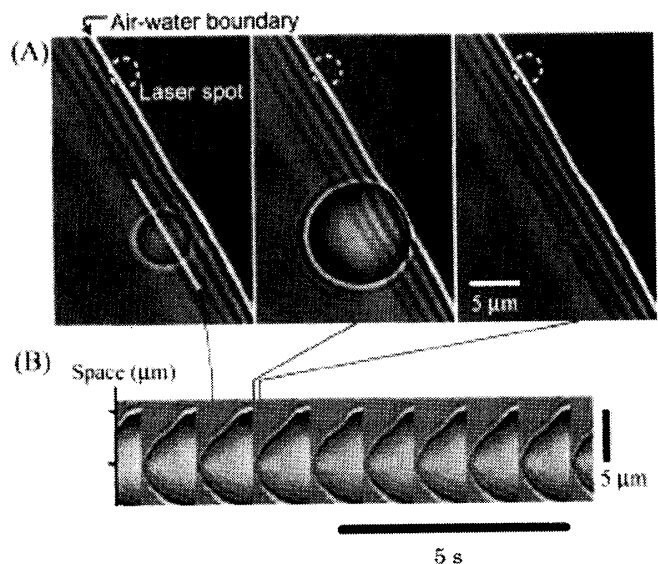


図2 (A)水滴の生成、成長、消失の光学顕微鏡像。
(B)時空間プロット

§ 3. ビーズクラスターの成長・爆発のリズム

図3, 4には、サブマイクロメートルの負に荷電したビーズが、レーザー(1064nm)の焦点位置で、クラスターを形成・成長し、爆発する様子をしめした。ここでは、レーザー焦点近傍に生じる引力的なポテンシャルと、光圧との競合により、不安定性が引き起こされ、自発的なリズム運動が観測されている。(Magome, et al., Phys. Rev.E, 65,045202(2002).)

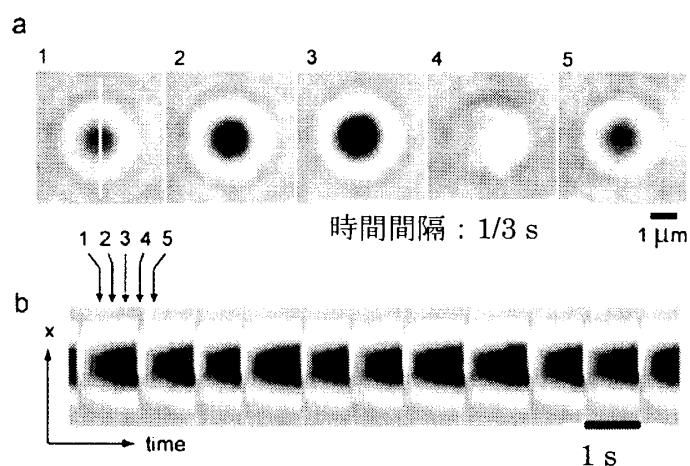


図3 プラスチックビーズの凝集・成長・消滅のリズム

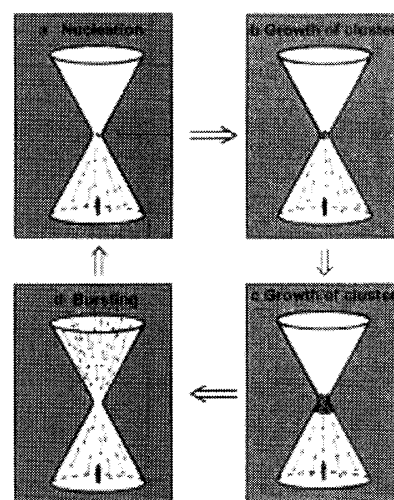


図4 ビーズクラスターのリズム運動の模式図

§ 3. ビーズクラスターの成長・爆発のリズム

図5には、油水の均一溶液に、レーザーを照射したことによって、生じる微小液滴の運動パターンを示した。ここで、均一相は oil-rich であり、water-rich の水滴が焦点付近から湧き出している。生成した水滴は、光場の斥力を受け周縁へ移動し、縮小・消滅する。油としては、トリエチルアミンを用いており、レーザーは波長 1064 nm の YAG レーザーである。(当研究室の向井、馬籠らの研究)

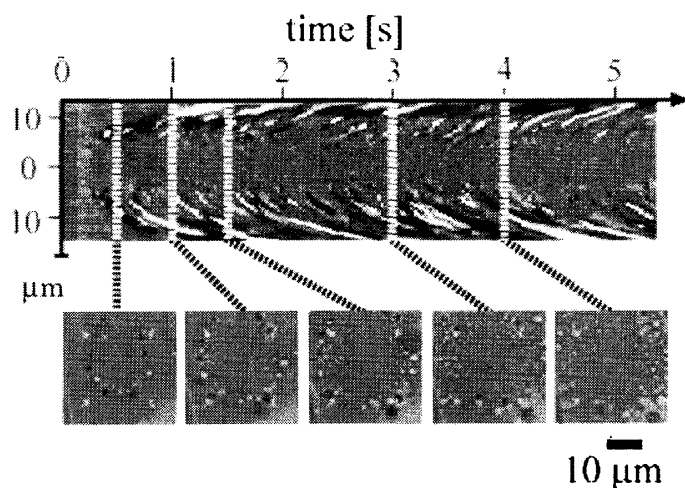


図5 均一相からのマイクロ水滴の湧き出し、成長、移動、消滅の運動パターン

§ 4. チューブの往復運動

図6、7には、リン脂質でできたチューブの末端がレーザーでトラップされている状態での往復運動の実験を示した。レーザー光は、光学的に二つのビームに分裂するようにしているため、チューブの配向方向が双安定となっている。レーザーによって、生じたマイクロなスケールでの温度勾配が、リズム運動の起動力となっている。(Nomura, et al., *Phys.Rev.Lett.*, 88,093903(2002).

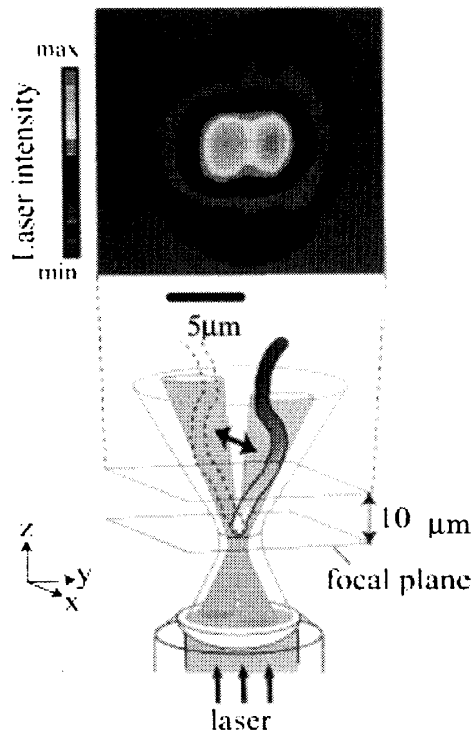


図6 リン脂質チューブの往復運動
(模式図)。

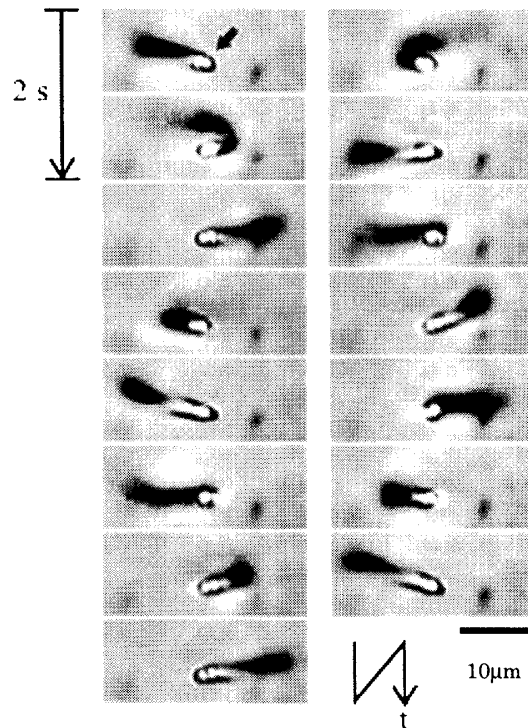


図7 チューブのリズム運動の光学
顕微鏡観察。

§ 5. 単一高分子鎖のリズム運動

DNA のような、semi-flexible な高分子鎖は、折り畳み転移が一次相転移となる。とすると、その速度過程は、時間依存性の GL 方程式にみられるように、3 次の非線形性であらわされる。そこに、もう一変数がフィードバックパラメータとして加わると、軌道安定なリズムが生じて良い。この考え方を、実際の実験で検証し、長鎖 DNA の fold/unfold の構造変化が、レーザー場で引き起こされることを観察した。(Mayama, et al., *Chem.Phys.Lett.*, 330, 361(2000).)

§ 6. 非平衡開放系は面白い

上記のように、光によって制御された非平衡開放場の世界で、時間併進対称性を破るような、様々な実験系を作ることが可能であることが分かった。光以外にも、化学反応や熱流などの介在する非平衡条件下では、自然は千変万化の変化を見せてくれる。未知の遊びの世界が、まだ手のつかない状態で残されている。

[文献] 1) 真山、吉川“レーザー場で創出される高分子の非線形ダイナミクス”、高分子、51, 936(2002). 2) 北畑、吉川“非線形システム：反応拡散系から生命現象へ”応用物理、71, 1126(2002). 3) 原田、吉川“生命現象と非線形科学”*Electrochemistry*, 71, 341(2002). 4) 吉川祐子、湊元、吉川“DNA の高次構造スイッチングと遺伝子発現”*生物物理* 42, 179(2002). 5) 吉川編、“DNA：紐の物理、分子情報から時空構造へのシナリオ”*数理科学* 6 月号(2002).