

京都大学全学共通少人数セミナー 平成21年度前期

科目名： 創造性とは何か？

担当教員名： 村瀬 雅俊

場所： 基礎物理学研究所

日時： 毎週火曜日 第5時限

E-mail: murase@yukawa.kyoto-u.ac.jp

Tel: 075-753-7013: Fax: 075-753-7010

第3回

進化ダイナミクスにおける自己・非自己循環原理の探求

— 構成的認識の理論と実践 — (その2)

3. 生体運動—カオスの制御と秩序の生成—

精子の運動を駆動する鞭毛は、図2aに示されているように、基本的に平面運動を示す。鞭毛に沿って空間座標 s ($0 \leq s \leq L$ 、 L は鞭毛の長さ) を導入する。鞭毛の屈曲運動は、その内部のフィラメントが相互に滑り運動を起こすことに起因している。鞭毛の根元では、フィラメントの滑り運動は起こらない。そのために、任意の点における屈曲角度 θ は、滑り量 σ に比例する (図2b)。モーメントの釣り合いの方程式 (1) から、鞭毛運動の基礎方程式 (2) を導くことができる。ここで、 S は、滑り力である。

Flagella equation

The moment-balance equation for a flagellum is written by:

$$M_S + M_E + M_V = 0 \quad (1)$$

where M_S , M_E and M_V are the viscous, shear and elastic moments, respectively.

↓

$$\frac{\partial^2(S - \gamma\dot{\sigma})}{\partial s^2} + E_B \frac{\partial^4 \sigma}{\partial s^4} + C_N \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

where S is the shear force, σ is the shear, E_B is the bending resistance, C_N is the external viscous drag coefficient and γ is the internal viscous drag coefficient.

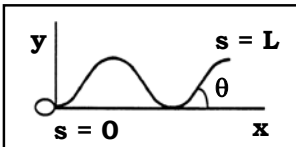


図2a

$$x = \int_0^s \cos \theta \, ds$$
$$y = \int_0^s \sin \theta \, ds$$

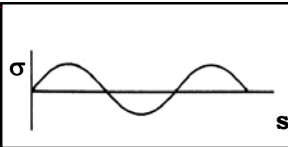
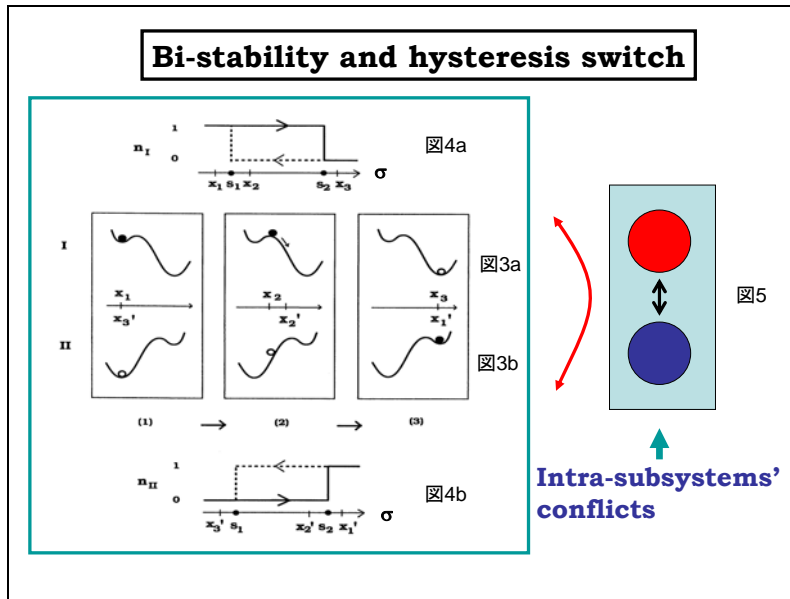
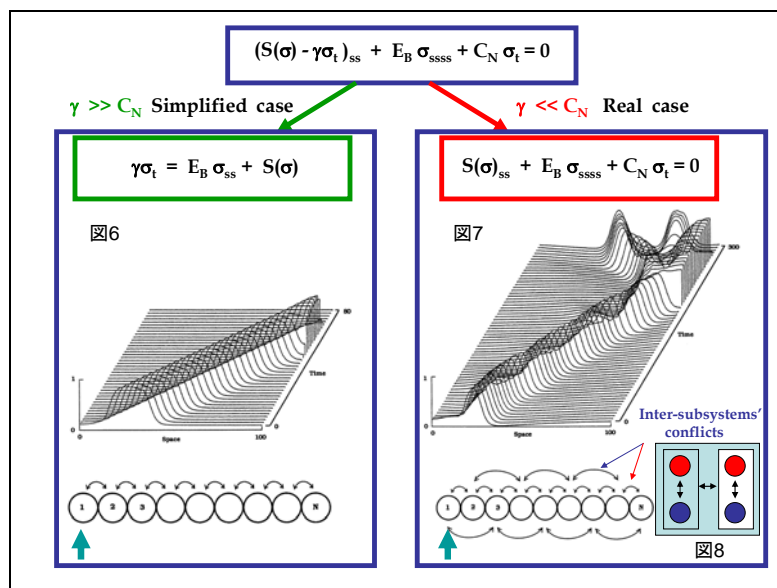


図2b



鞭毛が屈曲運動をするのは、この滑り力の向きが交互に逆転するからである。その機能は、互いに逆向きの力学ポテンシャル（図 3a、b）と滑り力の on-off が滑り量と運動履歴によって決まるというヒステリシススイッチ関数（図 4a、b）によって与えられる。図 5 は、鞭毛運動という対象認識が深まっていく過程を、後から再構成して捉える目的で描かれている。そこでは、2つの対立する運動系を、2つの対立した○が1つの単位として統合されているように表示している。

さて、鞭毛の形状は空間座標 s と滑り量 σ によって与えられる（図 2a、b）。そこで、上記の図 3、4 をによって規定される滑り力 S を、基礎方程式（2）に代入して解の挙動を調べる。

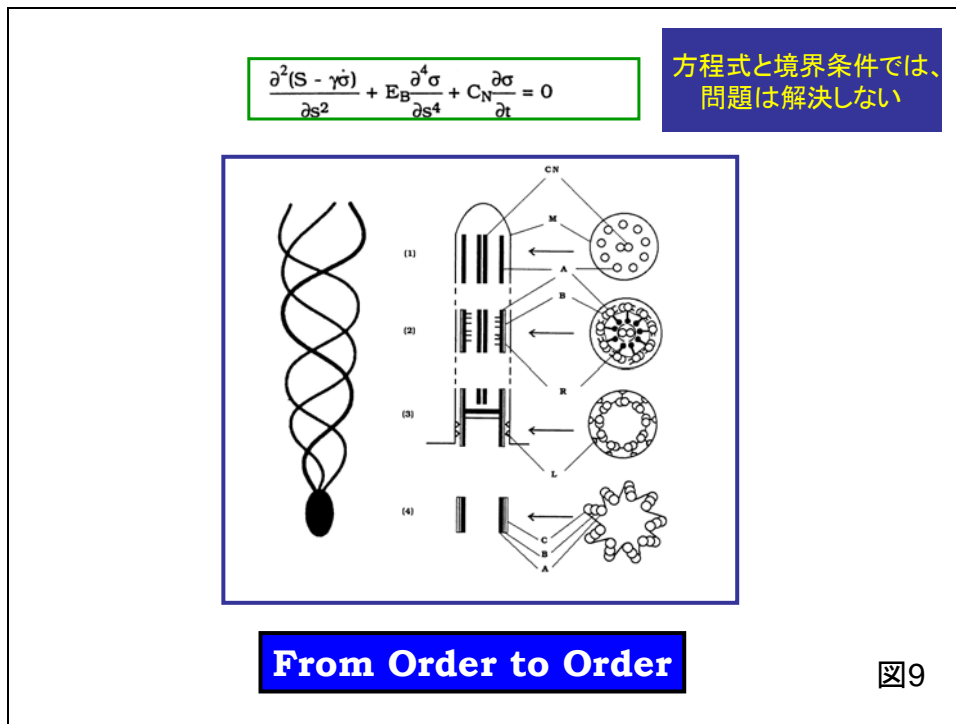


鞭毛内部の粘性抵抗 γ が、外部の粘性抵抗 C_N より十分に大きい場合には、基礎方程式 (2) は図 6 上部のように、時間 t に関する 1 階偏微分と空間 s に関する 2 階偏微分からなる偏微分方程式—いわゆる、反応拡散方程式—に単純化できる。この場合は、鞭毛における空間相互作用は、図 6 下に模式的に現したように、最近隣単位同士の引力的相互作用だけである。この単純な引力的相互作用のために、鞭毛の左端に形成された、屈曲はスムーズに右端へと伝播する。

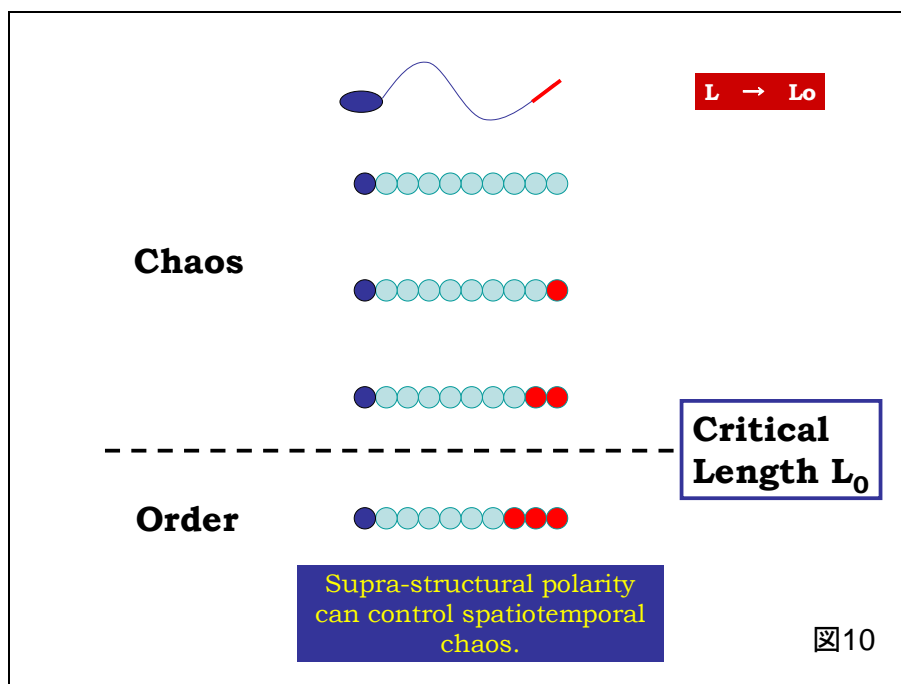
実際には、鞭毛内部の粘性抵抗 γ は外部の粘性抵抗 C_N よりも著しく小さい。その場合は、基礎方程式は図 6 上部のように、時間 t に関する 1 階微分と空間 s に関する 2 階と 4 階の偏微分方程式になる。そのイメージは、図 7 下に表したように、最近接相互作用は斥力的となり引力的に働く次近接相互作用と拮抗する。こうした、空間次元に関する相互作用の対立が 1 つの鞭毛というシステムに共存する状況を、図 8 のように示す。その意味は、1 つの「内部対立する単位」と別の「内部対立する単位」との間の対立がより高次の単位として成立するということである。

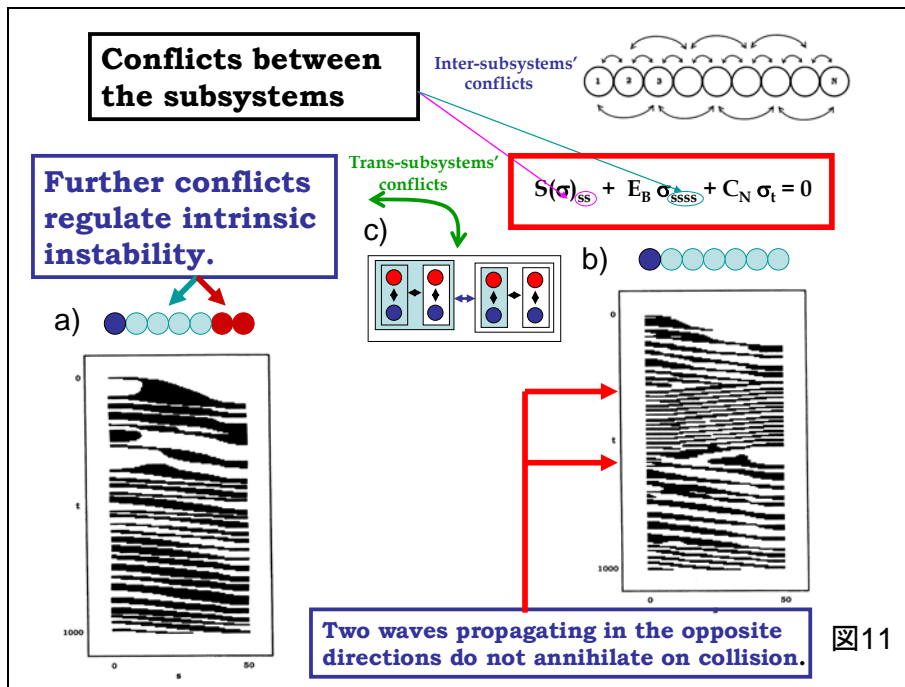
鞭毛内部の粘性抵抗 γ と外部の粘性抵抗 C_N との大小関係によって、図 6 と図 7 の相違が数値計算によって示されている。先にも、述べたように現実のパラメータは、図 7 のケースに対応する。このケースの特徴は、1 つの屈曲波の伝播が反射したり、途中で分岐したり、合体したりする。また、互いに逆向きに運動する 2 つの屈曲波は、互いにすり抜けたりもする。さらに、鞭毛に沿った空間座標ごとに、波長や周波数が異なるといった非定常性が見られる。実際に、このタイプの方程式は、**時間・空間カオス**を再現する **Kuramoto-Sivashinsky 方程式**と同じような構造を持っている (Murase, 1992)。

まず問題となるのは、こうした多様な運動現象が現実に観測されているかどうかである。そこで、さまざまな生物種の鞭毛運動を調べてみると、生物種の違いによって、多様な運動形態が報告されていることが明らかになった。ところが、別の生物種では、一方向にのみ屈曲運動を伝播するという秩序だった鞭毛運動パターンが報告されていたのである (Murase, 1992)。そこで、次なる問題は、このような時間・空間カオスを再現するような鞭毛運動の基礎方程式から、どのようにして一方向にのみ運動を伝播する秩序ある鞭毛運動を再現することができるのか、ということになる。これは、1950 年代頃から半世紀近くの間、細胞運動に携わる研究者にとって、大変大きな「なぞ」であった。



この「なぞ」は、基礎方程式だけをいくら眺めていても決して解くことはできなかつた。鞭毛両端の境界条件を、自由端や固定端などに置き換えて見ても無駄であつた。基礎方程式に基づく運動システムは、それ自体を制御する機構を持ち合わせてはいないからである。結論から言えば、問題解決の鍵は、鞭毛に沿った長軸方向の構造的非対称性に気づくか否かであつた (Murase, 1992)。

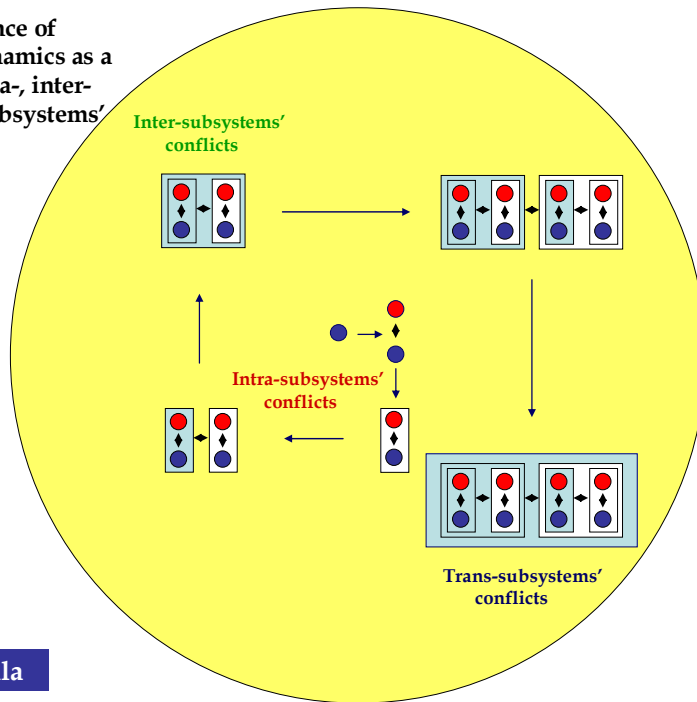




従来までの、鞭毛運動の理論では、鞭毛の構造的な異方性は全く考慮されていなかった。図9のように、鞭毛の先端領域はフィラメントの滑り運動を引き起こす‘運動性酵素’が存在していない。そこで、図10に模式的に示したように、その先端領域の長さLを少しずつ長くしていく。すると、ある臨界長 L_c で、一方向の進行波が選択的に励起されるようになった。その様子を、図11aに示してある。図11bは、先端領域の長さLが0の場合、屈曲波の進行方向が逆転する様子を示している。図11cの意味は、1つの「内部対立する単位」と別の「内部対立する単位」との間の対立がより高次の単位となり、それらが空間的位置の相違に関して互いに対立しながらさらに高次の単位となる、ということである。

これまでは、鞭毛運動に関する対対象認識がどのように進展していったかについて述べてきた。ここで、視点を変えて対象認識の認識であるメタ認識を考えてみたい。図12にその概略を示した。1つの単位が分裂と統合を繰り返しながら、より高次の構造が構成されていく様子を、時計回りの矢印で描いている。対立から統合にいたるには、ある種の飛躍を必要とする。私は、この飛躍こそ進化ダイナミックスの本質ではないかと考えている。こうした構図は、曼荼羅の本質ともいえるのである（村瀬、2001）。

The emergence of complex dynamics as a result of intra-, inter- and trans-subsystems' conflicts.



次節では、ダーウィンの自然選択説を対象に、認識の飛躍には対称によらずに普遍性・共通性があることを示そうと思う。