

# 似て非なるもの、それでも動きあるところに 生命あり

お茶の水女子大学理学部

森 義仁

## 1. はじめに

我々のグループは、非平衡下における自己発展現象の科学について、モデル実験系の設計を中心に、理論研究者と議論しながら研究を進めてきた。小グループでの研究会（1998年1月、1999年3月）と共に、既に小グループの研究者が中心に進めてきた「非線形反応と協同現象研究会（日本化学会研究会、1998年1月（千葉：秀島）、1998年12月（奈良：中田）、1999年12月（東京：森）、2000年12月（山口：三池）、2001年12月（東京：森）、2002年12月（奈良：中田）」ともジョイントし、活動してきた。実験研究者が中心である我々のグループでは、お互いの実験の成果を議論するだけでなく、「生物をまねたおもちゃづくり」を共通のテーマとして議論してきた。

## 2. 生物をまねたおもちゃ

「生物をまねたおもちゃ」設計において、「非線形・非平衡」を1つのキーワードとした。これは、生命体は、非平衡・開放系の下、エネルギーを流入、変換、排出しながら、生命活動を営んでいることに起因する。また、生命現象において、パラメータを2倍にすると応答が2倍になるような線形和が成り立たず、多様な応答を示すことから、生物は強い非線形素子といえる。このように、「非線形・非平衡」を実験システムに導入することにより、生物が示すような現象を人工的に発現することを「生物をまねたおもちゃ」設計とする。その中で「時空間発展する系」の設計と制御に着目し、グループ研究を行った。

## 3. 研究例

### 3-1. 樟脳円板による、自律運動と反応拡散系の結合

等方的な場（例えば円形セル）に等方的な形状の自律運動素子（円盤樟脳）を初期条件として等方的な位置（例えばセルの中心）に配置すると自律運動は発現しないが、異方的な条件（例えば、樟脳に船を付着する、セルの中心から離れたところを初期値とする）に設定すると、自律運動が発現する。この実験系を発展して新しい運動モードの発現を行った。具体的には、自律運動が起こりにくい円盤カンフェンを用いた。円盤カンフェンを小さめのシャーレ（例えば直径3センチ）中の水面に浮かべると、セルの中心に移行した後、停止した。そして、停止数分後、突然中心から外側に向けてすばやく動いた後、再びセルの中心へとゆっくりと移行した。このようなセル中心での間欠運動（「セルの中心へのゆっくりとした移動」→「数分間の停止」→「中心から外への急速な運動」）が約十数回繰り返された。セルの中心への移動と停止については、カンフェン円盤固体からシャーレの境界に向けて等方的に薄膜を展開し、シャーレの中心でつりあう状態に到達することを意味する。セルの中心から外へと急速な運動は、その力の釣り合いが壊れることで、カンフェン円盤が駆動力

を得たことを意味する。駆動力の獲得は、界面張力と接触角の測定により確認した。つりあいの崩壊の要因については、カンフェン円盤の表面（気相側）が、室温において固体から液体に状態変化し、それが液滴として表面に蓄積していく。その体積が円盤の表面積を越える得ると、水面へと流れ出し表面張力を下げ、流れ出した方向と逆の方向に運動が発現すると考察される。

### 3-2. 樟脳船による、自律運動と反応拡散系の結合

プラスチックの船に樟脳粒子を付着した樟脳船は、樟脳のない船首と樟脳のある船尾間の表面張力差（非平衡度）を駆動力として自発的な運動を示す。つまり船首では水の表面張力が働き、船尾では樟脳から展開される樟脳膜が表面張力を下げるため、「船首の表面張力>船尾の表面張力」となり運動する。また、この運動はある有限な面積においてもほぼ等速運動を示すが、これは、展開された樟脳膜の濃度が昇華によって低下し、界面がきれいになっていくため、ほぼ一定の駆動力を得ることができる。つまり樟脳船の運動は、エネルギーの流入（膜の展開）と流出（昇華による膜濃度の低下）を利用した非平衡開放系である。本研究では、この非線形素子（非平衡開放系で見られる非線形現象を示す物体として樟脳船をこのように呼ぶことにする）の結合による同調現象の実験と計算機シミュレーションを行った。具体的には、2隻の樟脳船を、同じ進行方向になるように円水路（水路幅: 5 mm、内直径: 15 mm）に浮かべて観測する実験を行った。

まず水相の温度が288K以下の場合、2隻の樟脳船はある位相差（円水路の中心とした2隻の船の角度差）を保ちながら進行した（phase locking mode）。この位相差は2隻の樟脳船の速度比に依存した（但し円水路が十分大きい場合には位相差には無関係になる）。例えば2隻の船が等価な場合、その速度も等しいことから、位相差は $\pi$  (rad) であった。また2隻の船の速度比が1/2の場合、位相差は $\pi/2$ であった。次に水相の温度が298K以上の場合、位相差が振動した（phase oscillatory mode）。例えば2隻の船が等価な場合、位相差 $\pi$ を中心に振幅 $\pi/2$ 、周期50秒の振動が見られた。2隻の船が非等価な場合、 $\pi$ とは異なる位相差を中心に振動した。このような温度に依存した運動モード変化は次のように考えられる。低温における等価な船の場合、展開された樟脳膜は昇華しにくいので、1隻の船から展開される樟脳膜はもう1隻まで及び、2隻の船はお互いの樟脳膜を感知する。このように船 $\alpha$ の船尾から船 $\beta$ の船首までの樟脳膜の濃度勾配と船 $\beta$ の船尾から船 $\alpha$ の船首までの濃度勾配は等しくかつ保たれるため、位相差が一定の等速運動をする。それに対して高温における等価な船の場合、展開された樟脳膜は昇華しやすいので、1隻の船はある距離に近づくともう1隻を感知しにくい。つまり2隻の船の距離が近づくと後方の船は減速し、離れると前方の船を感知しないので加速する。このようなメカニズムで phase locking mode と phase oscillatory mode が出現する。以上の実験結果をもとに計算機シミュレーションにより温度に依存したモード変化を再現した。理論式は基本的に2つの式で構成される。1つはニュートンの運動方程式であり、これには駆動力である表面張力、粘性抵抗、及び2隻の船の結合項（対流項とする）が含まれる。もう1つの式は、樟脳膜の界面における反応拡散の式であり、フィックの拡散方程式を基本としており、樟脳粒からの膜の展開、膜の拡散、及び昇華の項が含まれている。そしてこの2つの式は表面張力と樟脳膜の濃度勾配との関係で結合されている。これらの式を用いて昇華速度 $k$ を変化させたところ、 $k$ が大きい（すなわち高温の場合）場合 phase oscillatory mode を、 $k$ が小さい（すなわち低温の場合）、phase locking mode をそれぞれ再現することに成功した。このような計算機シミュレーションの構築は、モデルの普遍性や新たな実験設計への展開のために大変重要である。

### 3-2. 水道水を用いた履歴と分岐現象

ここでは、水道水の真下に器を置いて水を流すだけの簡単な実験系を使って、モード変化、履歴、及び振動が生じる現象について計算機シミュレーションと共に行った。特に明瞭な履歴と分岐点が得られるのが本実験系の特徴である。

流量が小さいとき容器に水を蓄えるモードIと、流量が大きいとき水を放出するモードIIが現れ、

ある流量で急激なモード変化が生じた。またモード変化I→IIとII→Iの2つの分岐点が明瞭に異なる履歴現象が存在し、分岐点は流径とレイノルズ数では依存性が異なった。また流径が小さい時、モードIを経て振動現象（モードIII）が現れた。以上について流量、水圧、及び水位を変数とした計算機シミュレーションを行ったところ、定性的に実験結果を再現させることに成功した。

#### 4. まとめ

生命現象で見られる非線形現象を比較的簡単な実験で再現した。比較的簡単な実験を用いることで、分野を越えた議論ができることが期待される。例えば、理論研究者による「実験結果をより反映したモデルの立てやすさ」とともに理論研究者側からも「新しい実験系の設計への助言のしやすさ」が利点となると考えている。