

## 粘菌を用いた認識と形成の数理解析によるアプローチ

高松 敦子

東京大学 生産技術研究所 共同研究員

### 研究のねらい

真正粘菌という原生生物を用いて、“形とリズム”に注目して非線形科学的観点から考察する。手法としてマイクロ加工という細胞サイズの加工を可能にする技術を用いて、粘菌細胞の形を制御し、非線形数理モデルと直接比較可能な“生きた数理モデル”を作る。

数理モデルによる比較対象としては結合振動子系を想定している。結合振動子系とは、非線形振動を示す要素(振動子)が相互作用する要素集合系であり、ニューロン集合体である脳、心筋細胞集団である心臓、蛍の集団など、生物系のあらゆる階層にみられるシンクロナイゼーション現象のメカニズムを説明するモデルとして注目されている[1]。本研究で用いる真正粘菌変形体も、細胞の厚みなどに非線形型の振動現象がみられ、細胞全体を結合振動子系の1つとして考えることができる。本研究では、生きたままの細胞を用いて各粘菌振動子の相互作用の強さなどを人工的に制御し、振動の時空間パターンを観察し、それらのパターンの生物における機能について考察することが目標である。

### 研究の成果と考察

生きたままの粘菌細胞を用いた結合振動子系を構築するために、マイクロ加工技術を用いて粘菌細胞の形を自在にパターンニングする技術を確立した(Fig. 1)。これらの系は、振動子部(丸い部分)と結合部(振動子部をつなぐチャンネル部分)から構成され、振動子部で振動現象を観察し、チャンネル部分の幅で振動子間の相互作用を制御する。

リング状に配置した粘菌結合振動子系(Fig. 1)では、1つの形状(振動子の配置と相互作用強度を固定した状態)で複数の振動の時空間パターンが観察され、さらに、それらパターン間を自発的に遷移する現象が見いだされた。非線形科学の分野で「カオスの遍歴」として知られた現象[2]に、これは近い。「カオスの遍歴」であるかどうかを見極めるため、現在、実験データの精緻化を行い、解析中である。「カオスの遍歴」について生物系で系統的に示された例はこれまでになく、この現象の生物学的意義について考察する良いモデル系になるだろう。

さらにそれぞれの振動パターンを、対称系の分岐理論[3]を用いて数学的解析を行った。この理論では、系に幾何学的対称性さえあれば、系を構成する要素の詳細な数理モデルなしに、系全体が示しうる振動パターンのカタログを与えてくれるので、生物系のように数理モデル構築が困難な系に有用である。その結果、予想されたパターンのほぼ全てが観測されていたことがわかった。これは、系統的に制御された生物実験系で初めて実証された結果であり、対称性の分岐理論の有用性を示した(論文3)。

さらに鎖状に配置した粘菌結合振動子系について、隠れた対称性を持つ振動の時空間パターンについて発見した。対称系の分岐理論によ

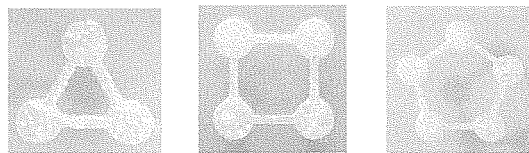


Fig. 1 リング状の粘菌結合振動子系

る解析では、鎖状振動子系の中心についての軸対称的振動パターンのみが観察されるはずだが、片端から他端への進行する Traveling wave 型のパターンを始め、軸対称だけでは説明が困難なパターンがいくつか観察された。鎖状振動子系の両端を繋ぐ隠れ振動子を1つ配置したモデルを用いれば、これらの全てのパターンをシンプルに説明できることがわかった。Traveling

wave はヤツメウナギやヒルを始めとした細長い生き物の神経活動パターンにも見られるが、我々のモデルを用いれば、系の特殊性を超えて応用可能である（論文1）。

次に、多重に示す振動パターンの生物としての意義を考察するために、粘菌結合振動子系に  
入力、つまり、外部刺激を与える方法として、多点温度刺激デバイスを開発した(Fig. 2)。温  
度刺激を与えるヒータ/センサーとしては透明抵抗体であるITO(Indium Tin Oxide)をマイクロ  
パターンニングすることで作成した。Fig. 2(A)のヒータによる加熱領域は粘菌振動子1個分の大き  
さ( $\phi=2\text{mm}$ )であり、また、多点温度をそれぞれに制御できるように設計してあるので、粘  
菌結合振動子系に複合的な刺激パターンを与えることができる(論文2)。現在、このシステ  
ムを用いて、多重振動パターン間の制御を試みている。粘菌結合振動系への入出力関係を調べ  
ることによって、振動パターンの表す生物としての意義を考察することができると考えている。

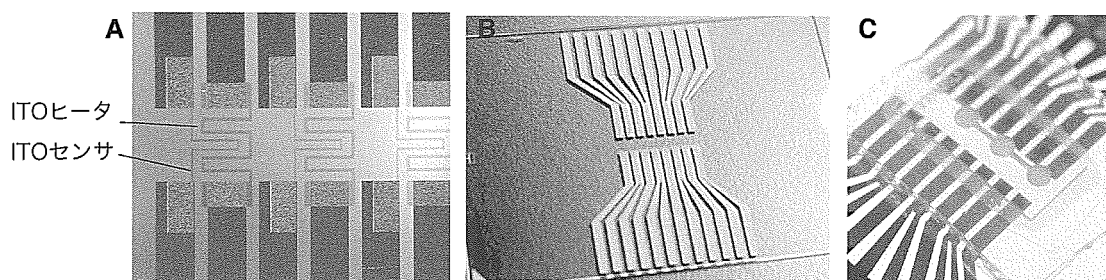


Fig. 2 温度刺激デバイス

(A) ITO ヒータ/センサー, (B)温度刺激チップ全体図, (C)パターンニングした粘菌の温度刺激

#### 参考文献

- [1] S. H. Strogatz (2003) "SYNC: The emerging science of spontaneous order" Hyperion, New York.
- [2] 金子邦彦、池上高志 (1998) 「複雑系の進化的シナリオ」朝倉書店
- [3] M. Golubitsky and I. Stewart (1999) in "Pattern formation in continuous and coupled systems", M. Golubitsky, D. Luss and S. H. Strogatz (Eds.), pp. 65-82, Springer, New York.

#### 主な論文

- (1) Takamatsu, A., Tanaka, R. and Fujii, T. (2003) "Hidden Symmetry in Chains of Biological Coupled Oscillators", submitted.
- (2) Takamatsu, A., Yamamoto, T. and Fujii, T. (2003) "Spontaneous Switching of Frequency-locking by Periodic Stimulus in Oscillators of Plasmodium of the True Slime Mold", to appear from *BioSystems*.
- (3) Takamatsu, A., Tanaka, R., Yamada, H., Nakagaki, T., Fujii, T. and Endo, I. (2001) "Spatio-temporal symmetry in rings of coupled biological oscillators of *Physarum plasmodium*", *Phys. Rev. Lett.*, **87** 078102.

#### その他

レビュー: Takamatsu, A., Fujii, T. (2002) "Construction of a living coupled oscillator system of plasmodial slime mold by a microfabricated structure" Chap. 1.2 in *Sensors Update* Vol. 10, No. 1, 33-46, Wiley-VCH, Weinheim.