

バクテリアの紐状成長における複雑な折り畳み過程の定量化

納豆菌を仲間とする枯草菌を寒天上で培養すると、美しいフラクタル成長パターンが見られる。どのようなプロセスを経て、ミクロなバクテリア細胞からマクロなフラクタル構造が形成されるのであろうか。枯草菌はある環境下において、細胞分裂を繰り返すものの、細胞の分断は起こさず、1本の細長い紐状に伸びていく。指数関数的に長さを増すこの細胞鎖は、折り畳み過程を繰り返しながら次第に寒天培地上を覆い尽くしていく。中央大学理工学部の本田（大学院生）らは、ビデオ画像を丹念に調べ、この折り畳み過程の定量化を行い、非線形微分方程式系での記述に成功した。

系の対称性、すなわち変換に対する不変量の研究は物理学における中心課題の一つである。時間経過、空間並進、および回転はいずれも変換と見なせるが、これらの変換に対する不変量がそれぞれエネルギー、運動量、および角運動量に他ならない。フラクタル（自己相似）図形と、連続相転移に伴う臨界現象は、縮小や膨張といった系のスケール変換に対して不変な（あるいは共変な）系として特徴付けられる。図1はシャーレ内の寒天培地上に接種した（納豆菌を仲間とする）枯草菌のコロニー成長に見られるパターンの写真である。この画像データから、フラクタル次元とよばれるスケール不変量を見積もることにより、バクテリアのこの美しい成長パターンは拡散律速凝集過程（DLA）と同じユニバーサリティー・クラスに属することが実験的に検証されている。しかし、極端に小さなスケールではスケール不変性は破れるはずである。バクテリア・コロニーは、所詮ある大きさの細胞の集まりだからである。（枯草菌は直径 0.5~1.0 ミクロン、長さ 2~5 ミクロンの棒状の細胞からなる。）それでは、ミクロなバクテリア細胞の集まりから、どのようなプロセスを経てマクロなフラクタル構造が形成されるのであろうか。



図1. 枯草菌コロニーの示す DLA 的フラクタル・パターン

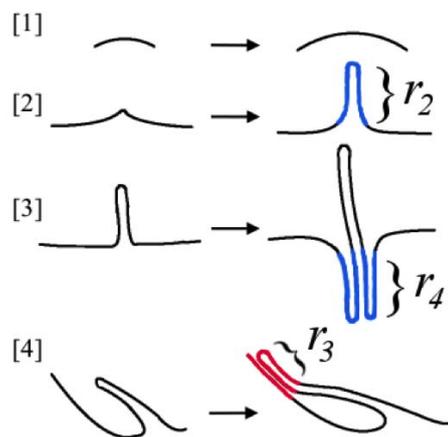


図2. 細胞鎖の折り畳み過程における素過程

バクテリアを寒天培地に接種すると、誘導期とよばれる不活性期間を経たのち細胞分裂を始め、指数関数的に細胞数を増やし（対数期）、最終的には細胞数が飽和した定常期に至る。枯草菌は、寒天は固いが栄養は豊富であるような環境下では、対数期において一定の倍加周期で細胞分裂を繰り返すものの、細胞の分断は起こさず、寒天培地上を1本の細長い紐状に伸びていくことが以前か

ら知られていた。その途中で複雑な折り畳みが繰り返され、ある場合には特異な高次構造が形成される。特に、アリゾナ大のメンデルソンらは、彼らがマクロファイバーとよぶヘリックス構造の形成とその運動を長年に亘って研究していた（例えば、*Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 1627 参照）。中央大学工学部の松下・脇田研究グループは、フラクタル物理学の観点からバクテリア・コロニーのパターン形成を系統的に研究してきた。過去の一連の論文においても、しばしば枯草菌培養初期の紐状成長に関する記述が見られる。光学顕微鏡による鮮明なビデオ撮影もなされていた。全長が指数関数的に伸びる一繋りの細胞鎖が折り畳み過程を繰り返しながら、次第に寒天培地上を覆い尽くしていく様子が記録されている。1次元構造から2次元平面上のフラクタル構造が自己組織的に形成されるプロセスをどのようにして定量的に捉え、物理として記述することができるのか、根本的問題であった。

最近、中央大学の本田らは、対数期初期におけるビデオ画像1枚1枚を丹念に調べ直すことを始めた。細胞鎖の画像から手作業で「一筆書き」の曲線をトレースし、折り畳み過程の結果、各時刻で2重線になっている部分の長さ、3重以上になっている部分の長さを、その時点でまだ折り畳みが生じていない単線部分の長さとともに測り、数値データに整えた。すでに周囲で形成されている複雑な折り畳み構造を「平均場」と見なし、その中において、図2に示したいくつかの単純な素過程だけに着目するという粗視化を行い、単線、2重線、および3重以上の部分の長さの時間発展を記述する非線形方程式系を考案した。その解析的な積分解は、いくつかのパラメータ・フィッティングを行うことにより、上述の実測データをよく再現することができた。フィッティングで得られたパラメータの値は、図2で示した素過程のうち、[2] や [3] といった副次構造への遷移率に単純な法則性があることを示唆する。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2015 年 11 月号に掲載された。

図2の折り畳み素過程は、遺伝情報ではなくマクロな力学法則によって生物の形や運動の仕組みを解明しようとするバイオメカニクスで実現できるかもしれない（和田浩史（立命館大学工学部）：*日本物理学会誌* **68** (2013) 612 参照）。またこの図は、バクテリアといった生物系を離れて、平面上に置かれたワイヤーのたわみ形状の相図に関するチューリッヒ工科大のストゥープらの論文（*Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 094101）、マサチューセッツ大のデメリーらの薄膜の折り畳み動力学の論文（*Phys. Rev. E* **90** (2014) 042401）、あるいは、パリ高等師範学校のレヒノウトらの「折り紙」の力学に関する研究論文（*Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 244301）に掲載されている写真や図を思い起こさせる。相転移・臨界現象の研究は、動的臨界現象の解明を経て、現在、非平衡系においても著しく進展している。同様に、フラクタル物理学もそのダイナミクス解明へと発展していくのであろう。

原論文

[Self-elongation with sequential folding of a filament of bacterial cells](#)

[Ryojiro Honda, Jun-ichi Wakita, Makoto Katori: *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** \(2015\) 114002](#)

問合せ先： 香取眞理（中央大学工学部）

脇田順一（中央大学工学部）