

バクテリア増殖によるパターン形成

中大理工 松下 貢、脇田 順一

新潟大医 松山東平

1. はじめに

バクテリアの集落パターンは、菌の種、株を固定しても物理的な環境条件の違いによって大きく変化し得る。^{1, 2)}我々は直径約9 cmの滅菌シャーレ中に用意した薄い寒天平板の培地(厚さ約3 mm)の表面中央部に枯草菌 *Bacillus subtilis* を点状に接種し、35℃で培養した。ここでは環境条件として、寒天中に仕込んだ栄養(ペプトン)濃度と、寒天培地の柔らかさ(寒天そのものの濃度で調節)の2つの量だけを変える。その結果、バクテリア集落は寒天板の表面上を2次元的に成長し、そのパターン変化について図1のような相図が得られた。³⁾以下ではこれについて考察する。

2. 集落パターンの相図

図中のA領域では集落パターンは開いた枝分かれ構造を持ち、自己相似フラクタルの性質を示す。このパターンはフラクタル次元や、枝の成長の遮蔽効果、集落間の反撥など、集落パターンの示す多くの特性から、栄養がつくるラプラス場の中でのDLA(diffusion-limited aggregation)成長として非常によく説明できる。⁴⁾この領域を起点にして栄養濃度を増す(図の縦軸上方に移動する)と、それにつれて枝は太くなり、B領域では集落パターンは成長界面の荒れた、概ねコンパクトな構造を示すようになる。この領域での成長はEdenモデルあるいはそれを一般化したモデル⁵⁾で記述できると思われるが、その場合に期待される成長界面の自己アフィン性⁶⁾の検証は今後の興味ある課題である。領域Dでは集落パターンは外形をほぼ円形に保って一様等方的に広がる。E領域での集落パターンは密な枝分かれ構造を持ちかつ枝の先端部のつくる輪郭は非常に滑らかな、いわゆるDBM(dense branching morphology)的特性を顕著に示す。この意味でD領域でのパターンはこのE領域でのパターンの枝が融合してできたパターンと見ることができる。C領域の集落パターンは内部ではEでのそれに似て比較的密な枝分かれ構造を示すが、その外形はDBM的ではなくむしろDLA的であり、EとAあるいはBとの中間的なパターンを呈する。

3. 細胞の運動

これらの領域間で集落パターンの成長速度に非常に大きな差があることがわかった。集落がシャーレ内で差し渡し約5 cmに成長するのに、領域A、Bでは約1カ月から1週間かかるのに比して領域C、Eでは1日、Dでは半日ですむ。これは集落パターンの成長様式が領域A、Bと領域C、D、Eの間では本質的に異なることを暗示する。実際、集落の先端部での成長の様子を顕微鏡で直接観察すると、領域C、Eでは個々のバクテリア細胞が激しく運動しているのが見られた。領域Dにいたっては集落内のほぼ全域にわたってこの運動が観察される。これに対して、領域A、Bではこのような運動は見られない。すなわち、領域A、Bでの集落パターンの成長はその界面を構成する細胞が栄養を摂取して成長し、その場で分裂・増殖することによる。他方、領域C、D、Eでの集落パターンの成長は集落内部での分裂・増殖だけでなく、細胞の運動による界面の前進で起こるので非常に速いのである。

図中の点線はこのような個々の細胞の運動の有無の境界を表す。これを見ると、細胞運動の発現が集落パターンの遷移を惹き起こしているように見える。これを確認するために、我々は運動性のない変異株を上で使った野生株から分離・増殖し、これでもって同様の実験を繰り返した。その結果は領域C、D、Eが消え、領域A、Bが図1の横軸方向に延びて図の全域にわたって観察された。³⁾従って、確かに細胞の運動が集落パターンの遷移を誘起していると考えられる。

4. おわりに

ランダム・パターンの形成を広く一般的にながめた場合、Eden、DLA、DBM的パターンは電析、樹枝状結晶成長など多くの現象に見られ、かなり普遍性のあるパターンであると思われる。バクテリア集落のパターンでもコンパクトなEden的パターンはごく普通に見られる。ただし、その成長界面の自己アフィン性の確認は今後の課題である。また、枯草菌と同じ桿菌の仲間である大腸菌(*Escherichia coli*)やネズミチフス菌(*Salmonella typhimurium*)等も寒天が硬めで養分濃度の低い拡散律速的な条件下ではDLA的な集落パターンが形成されることがわかってきている。⁶⁾

DBMはその見かけ上のパターンの単純さにもかかわらず、その成長機構が依然として不明であり、それを生み出すような物理的に納得のできる単純なモデルもまだ提案されていない。領域E、あるいはその周辺の領域で観察される集落パターンの振舞いの考察からDBMパターンの形成機構が見出されることが期待される。

領域Dで見られる単純なパターンは再考に値する。集落パターンのほぼ全域で見られる個々の細胞の運動は必ずしもブラウン運動ではないようだが、第1近似としてはそうみなしてよいであろう。特に、成長界面は他の領域の場合とは違ってミクロ（細胞のサイズ）にはファジーで、拡散的である。領域Dは栄養が豊富なので、細胞の分裂・増殖もはっきりとは確認しにくいが集落パターンの全域で起こっているはずである。これは領域Dでの単純なパターンの成長がFisher方程式で記述できることを強く示唆する。¹⁾このこと自体及び領域DからEへのパターン変化の特性、特に成長界面の不安定性など、を実験的に調べることは非常に興味深い今後の課題である。理論的にはFisher方程式あるいはそれを適当に修正した方程式が観察されるパターン変化を記述できるかどうかに興味深い。

参考文献

- 1) H. Fujikawa and M. Matsushita: J. Phys. Soc. Jpn. 58 (1989) 3875, 60 (1991) 88.
- 2) 松下 貢: 日本物理学会誌 47 (1992) 441.
- 3) M. Ohgiwari, M. Matsushita and T. Matsuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 61 (1992) 816.
- 4) M. Matsushita and H. Fujikawa: Physica A 168 (1990) 498.
- 5) F. Family and T. Vicsek (ed.): *Dynamics of Fractal Surfaces* (World Scientific, Singapore, 1991).
- 6) T. Matsuyama and M. Matsushita: Appl. Environ. Microbiol. 58 (1992) 1227.
- 7) M. Matsushita, M. Ohgiwari and T. Matsuyama: in *Surface Disorder: Growth, Roughening and Phase Transitions* (Nova Science Publishers, New York, 1992).

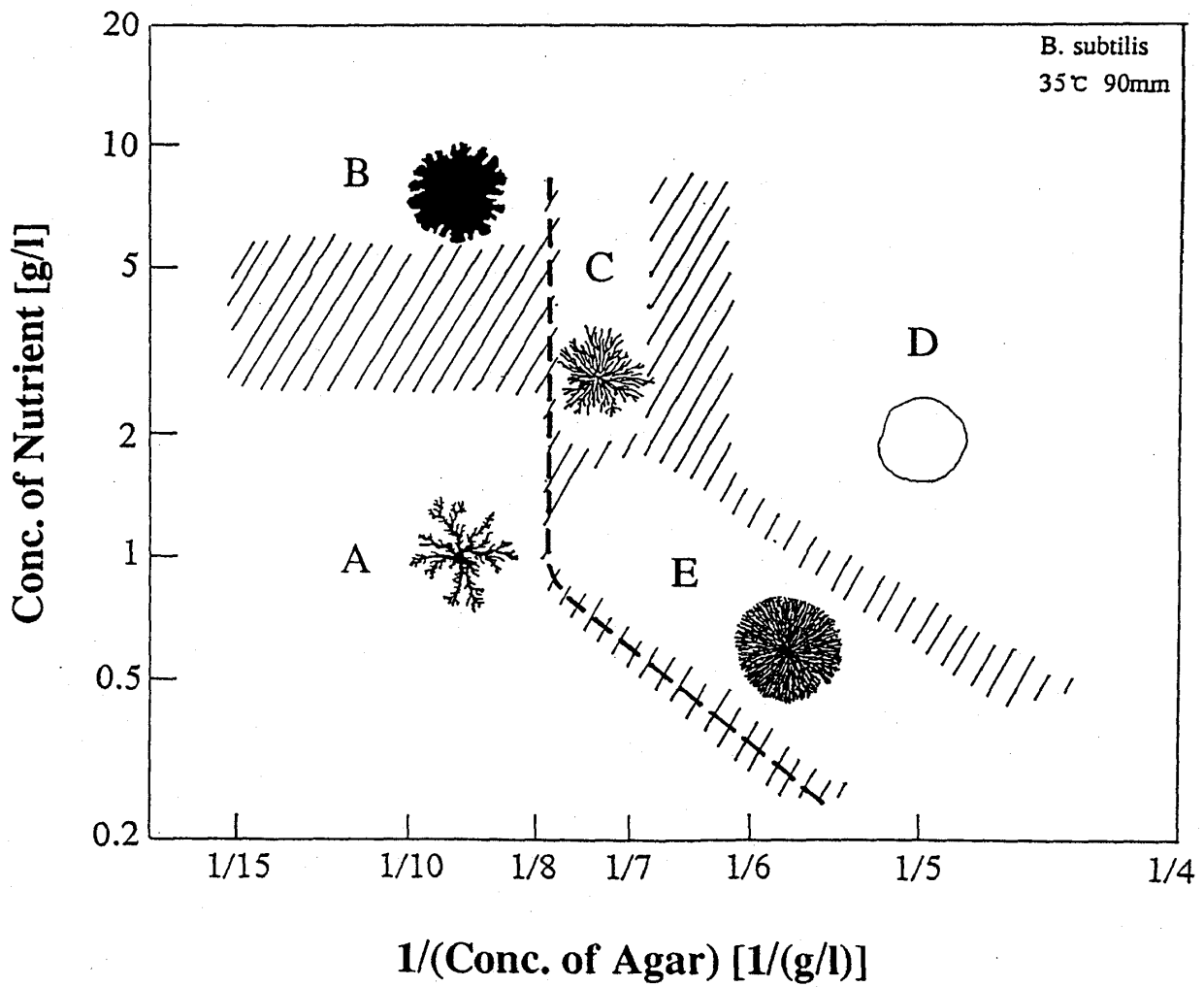


図1 : 枯草菌 (*B. subtilis*、野生株) の集落の環境条件によるパターン変化。