

934.

Toyoda, T. (1989). Finite-temperature Fermi-liquid theory of electrical conductivity, *Phys. Rev. A*, **39**, 2659-2671.

豊田 正 (1990). ウォード-高橋関係式の意義と効用 —— 物性物理学における場の量子論と対称性, *科学*, **60**, 164-171.

Toyoda, T. and Takahashi, Y. (1992). Marginal Fermi-liquid model and Ward-Takahashi relations, *Phys. Lett. A*, **161**, 553-555.

Varma, C.M., Littlewood, P.B., Schmit-Rink, S., Abrahams, E. and Ruckenstein, A.E. (1989). Phenomenology of the normal state of Cu-O high-temperature superconductors, *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 1996-1999.

バクテリア増殖によるパターン形成*

中央大学 理工学部 松 下 貢

抄 録

バクテリアのコロニーは種や環境条件の違いによって様々な形を示し、まさにパターン形成の宝庫である。ここでは、最近、研究の進展が著しいフラクタルなどのランダム・パターン形成の物理の視点からこのバクテリア・コロニーの形成を議論する。簡単な細胞形を持つ枯草菌を試料バクテリアに選び、培地の寒天濃度と養分濃度を変えて培養するだけで、そのコロニーが物理・化学系のパターン形成ではおなじみのDLA, Eden, DBM 状などのパターンに成長する。また、コロニー内での個々のバクテリアの運動の発現がこれらのパターン間の遷移をもたらすことをみる。

1. はじめに

生物系のパターン形成は物理・化学系のそれに比して、はるかに複雑だと信じられている。生物学的現象は通常、それ自体非常に複雑な生物固有の因子と環境条件とが複雑に絡み合っ起こるからである。しかし、単体の形態形成はともかくとして、生物集団のパターン形成では環境条件など純粋に物理的な要因の方が支配的であるような極限的な場合もあり得るのではなからうか。このような視点に立って、最も単純な生物の一つであるバクテリア（細菌）のコロニー形成に着目する。その結果、以下に見るように、物理・化学系でのランダム・パターン形成 (Avnir ed. (1989)) よりも物理的にはるかによく“理解”できる場合が確かにあることが知られる。

大腸菌など通常のバクテリアは単細胞生物である。ごく少数のバクテリア細胞でも、栄養を含んだ寒天などの培地の表面に接種すると、発育と分裂を繰り返す、ついには膨大な数の密集した細胞の集まりであるコロニーを形成する。このコロニーは菌種により大きさ、形、色が異なるし、温度など環境条件の違いによっても大きく変化する (シングルトン・セイズブリー (1982))。まさにバクテリア・コロニーはパターン形成研究にとっての宝庫である。我々の目標は、(微)生物学の詳細には立ち入らないで、最近、研究の進展が著しいフラクタルなどのランダム・パターン形成の物理 (ヴィチェック (1990), フェダー (1991)) の観点からこのバラエティに富むバクテリア・コロニー形成の秘密の一端を垣間見ることである。

* 物理学会誌 1992 年 6 月号に掲載されたものに加筆・訂正した。

2. 実験方法

試料バクテリアとしてここではバシラス属 (*Bacillus*) に含まれる枯草菌 (*B. subtilis*) を用いる。これは土壌や水の中に広く分布している直径 $0.5 \mu\text{m}$ 、長さ $2 \mu\text{m}$ 程の棒状の桿菌で、我々素人にも扱い易い。日常の食生活でなじみ深い納豆菌 (*B. natto*) はこの枯草菌にきわめて近い種だそうである。以後断わらない限り菌株を固定する。バクテリアは頻繁に突然変異を起こし、変異株のコロニー・パターンは一般に元の株のそれとは非常に異なるからである (但し、後述するように、この性質を積極的に利用することもできる)。

培地としては、指定量の寒天を含んだ寒天ゲルを直径 9 cm 程度のプラスチック製滅菌シャーレ内に固定した寒天板を用いる。これには指定量のペプトンをバクテリアの発育・増殖のための栄養分として加えておく。用意された薄い寒天板 (厚さ 3 mm 程度) の表面に菌株を点状に接種し、恒温培養器内 (ここでは 35°C に保持) で所定の時間だけ培養する。寒天培地や培養の詳しい準備手順は文献 (Fujikawa and Matsushita (1989, 1991), Matsushita and Fujikawa (1990), Ohgiwari et al. (1992)) に譲るが、バクテリアの培養の際にごく普通に行われている操作法と変わりはない。

得られたコロニー・パターンは直接写真に撮るか、テレビカメラを介してパソコンに取り込み画像解析を行う。

ここで重要なことは、寒天培地内の寒天濃度 C_a と養分 (ペプトン) 濃度 C_n の二つの量を、コロニー形成の環境条件を変えるパラメータとして採用したことである。前者は寒天ゲルの硬さに関係し、 C_a を増すと寒天板は硬くなる。通常、蒸留水 1 l 当りの仕込濃度にして $C_a = 4 \sim 20 \text{ g/l}$ 程度の範囲が寒天を使った固形培地として採用される。文献 (シングルトン・セイズブリー (1982)) によると、この菌種について、“普通寒天培地上のコロニー (37°C で 24 時間後) はほぼ円形で、鈍い黄色がかった、直径 5 mm くらい” としか書かれていない。上の二つのパラメータの値を変えて、観察時間を大幅にとるとどうなるであろうか。

3. コロニーの拡散律速成長

固形培地として普通に用いられている寒天ゲルの網目の穴径は枯草菌の直径より小さいので、菌は寒天板の中には入り込めない。従って、菌が寒天ゲル中に含まれている養分を摂って発育・分裂を繰り返したとしても、そのコロニーは寒天板の表面上ではほぼ2次的にしか成長し得ない。

まず寒天濃度 C_a を $10 \sim 15 \text{ g/l}$ の範囲の値に固定する。このようにして得られる寒天板は硬めである。この寒天板上にインクを一滴垂らすと、それがシャーレ内の寒天板中に充分拡散するのに1週間かかる。換言すれば、養分の拡散がコロニー形成に反映するのを見るには少なくとも1週間以上は培養しなければならない。これが第一の慣習破りの操作、条件である。

この寒天板の表面の中心近くに菌株を点接種しても、養分としてのペプトン濃度 C_n が 0 g/l だと、3週間後でもコロニーの成長は見られない。しかし、 C_n の値を $0.25, 0.5 \text{ g/l}$ と増すに従って、3週間後のコロニーの大きさが増す (Matsushita and Fujikawa (1990))。この観察結果は当り前のようであるが、養分ペプトンの存在が第一にコロニーの成長を制御していることを示す点で重要である。

養分の拡散がコロニー・パターン形成にどのように影響するかを見るためには、拡散長をパターンそのものの大きさよりも大きくしなければならない。それには C_n をできるだけ小さくしてコロニーの成長速度を抑えればよい (拡散長 $l = 2D/v$ 。ここで D は養分の拡散係数、 v はパターンの成長速度)。そこで C_n を普通に用いられる値の $1/10$ 以下である 1 g/l の小さな値に

固定する。これが第二の慣習破りの条件である。こうして、1カ月間の培養の後に得られたコロニー・パターンの1例を図1(a)に示す。ランダムに枝別れしていて、大枝がそれによく似た中枝からなり、それがまた小枝からなり、...と入れ子的な構造を持ち、外に開いた自己相似的なパターンである点が特徴的である。

一方、図1(b)は、正方格子上でパターン形成を、DLA (diffusion-limited aggregation; 拡散に支配された凝集) モデル (Witten and Sander (1981)) によって計算機シミュレーションした結果である。このモデルは、遠方で放出された1個のブラウン粒子が原点近くにあるクラスター (最初は原点上の1点) の表面に到達したとき、そこに付着凝集させる操作を繰り返してクラスター・パターンを成長させるという単純なモデルである。このようにして生成されたクラスターが自己相似であることは、計算機シミュレーションによって確かめられている (Meakin (1988))。2次元、3次元空間でのフラクタル次元 D は、それぞれ、 $D \cong 1.71, 2.50$ である。DLAの自己相似的成長は定性的には次のように説明できる。遠方から来たブラウン粒子は、その濃度勾配のためにクラスターの内部に侵入しようとする。ところが、ブラウン粒子の軌跡はぼやっと広がっていて、決して直線的ではない (ブラウン粒子の軌跡は自己相似で、そのフラクタル次元は空間次元 d に無関係に $D=2$)。従って、それらのブラウン粒子は外に伸び出したクラスターの主要な枝によって容易に捕獲され、クラスター内部への侵入を妨げられる (遮蔽効果)。こうした振舞いはスケールに依らない。このように、DLAでは粒子の侵入と遮蔽とのバランスによって自己相似的成長が実現しているのである。しかし、このような簡単なモデルでも理論的には完全に理解されているわけではない (ヴィチェック (1990), フェダー (1991), Matsushita (1990))。

DLAモデルでは常に1個のブラウン粒子だけが空間を動き回っているので、クラスターの成長は非常に遅い (拡散長 $l = \infty$)。ブラウン運動は拡散と等価であるが、このような場合には拡散方程式の時間項が無視できる (準静的近似)。即ち、DLAはラプラス場の中でのランダム・パターン形成を記述するプロトタイプ・モデルとみなせる。実際、DLAは電析 (金属葉¹⁾)、誘電破壊 (リヒテンベルク図²⁾、稲妻など)、樹枝状結晶成長、ヴィスカスフィンガリング³⁾、石膏などの化学溶解等、多くのランダム・パターンの形成を説明する興味深いモデルである (ヴィチェック (1990), フェダー (1991), Witten and Sander (1981), Meakin (1988), Matsushita (1990))。

ここで、図1(a)と(b)の間に明らかな類似性が存在することに気付く。バクテリア・コロ

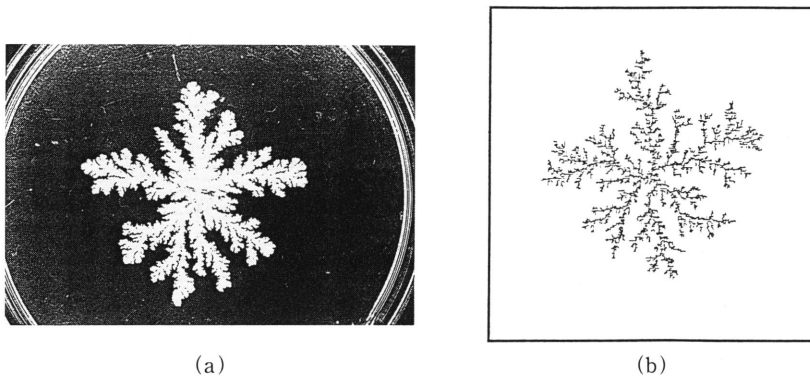


図1. (a) $C_a=10 \text{ g/l}$, $C_n=1 \text{ g/l}$ で1カ月間培養した後に得られた枯草菌 (*B. subtilis*) のコロニー・パターン. (b) 計算機シミュレーションで得られた粒子数 $N=10,000$ の2次元 DLA クラスター.

ニーの枝の方が少し太めであることを除けば両者の形はそっくりである。実際、(a)と同様の条件で得られたコロニー・パターン 20 数個について、ボックスカウント法⁴⁾(ヴィチェック (1990), フェダー (1991)) を使って調べたところ、自己相似性は長さスケール 2 桁位にわたってよく成立し、フラクタル次元として $D \cong 1.72$ が得られた。これは 2 次元 DLA の値とよく一致する。もちろん、形が似ている、あるいはフラクタル次元がよく一致したからといって、コロニーの形成が DLA で説明できると結論するのは早計である。スナップショットとしての静的な形の情報だけからその形成機構を探るのは至難だし、同じフラクタル次元を持つパターンはいくらでも存在し得るからである。動的特性に関連した実験的証拠が明らかに必要である。

そこで、まず上述の遮蔽効果に注目しよう。これはクラスターを構成する枝同志の競合で、一旦出遅れた枝はその後もほとんど成長しない現象として観察される。クラスター表面で濃度 0 の境界条件を満たすラプラス方程式の解を想像すれば明らかで、遮蔽効果はラプラス場内でのパターン形成に特徴的な現象なのである。この現象がコロニーの形成の際に実際に起こっていることは、図 2(a) に三角マークで示された枝が、その後、図 2(b) でほとんど成長していないことから明らかである。このような振舞いはコロニー形成の際には常にしかも歴然と観察された (Matsushita and Fujikawa (1990))。

次に、寒天板表面の 2 点に菌株を同時に接種したところ、図 3(a) に示したように、二つのコロニーが互いに反撥しながら成長する様子が観察された。この反撥現象も遮蔽効果と同じメカニズムによるものである。また、等電位の 2 電極からスタートした放電が決して融合し得ないことにも類似した現象で、やはりラプラス場内でのパターン形成に特徴的な振舞いなのである。実際、2 個の種粒子から成長させた DLA モデルのシミュレーションの結果 (図 3(b)) と比べてみると、両者の類似は一目瞭然である。

このような結果を総合して考えると、上記の条件下でのコロニー成長が主として DLA 機構によることは明らかであろう。残る問題は何がラプラス場を作っているのか、あるいは何が拡散するのかという点である。我々はいま生き物を対象としているので、食物だけでなく排泄物の拡散もコロニーの成長を律し得る。最初に記したコロニー成長の養分濃度依存性の結果から、養分の方がより重要であることは充分予想される。これを確認するため、ペプトンを寒天板の片隅にだけ局在させて仕込み、菌株を中央に接種した。もし排泄物の拡散がより重要であるとすれば、コロニーは等方的に成長するはずである。また、バクテリアは、ここまでの実験で使った硬めの寒天板の表面上を動き回ることができないこともわかっている。結果はコロニーが養分を仕込んだ箇所に向かって成長することが観察された (Fujikawa and Matsushita (1989, 1991), Matsushita and Fujikawa (1990))。この実験事実は、養分の拡散がコロニー・パターンの形成に最も重要であることを示している。

以上により、この環境条件下では我々のバクテリア (枯草菌) のコロニーは、養分 (ペプトン) の濃度場内で DLA 的に成長していると結論できる。

4. コロニーの形態遷移

上述の実験では環境条件 (養分濃度, 寒天濃度) を固定して、コロニー・パターンの形成を観測した。では、環境条件が変わるとコロニー・パターンはどのように変化するであろうか。換言すると、環境を規定するパラメータを変えたときのパターンの“相図”を考えてみたい。結論を先にいうと、図 4 が現在までに得られている我々の実験結果である (Ohgiwari et al. (1992))。ここで縦軸には養分濃度 C_n の対数を、横軸には寒天濃度 C_a の逆数を目盛ってある。前章では C_n が低く C_a が比較的高い (寒天が比較的硬い) という環境条件下だったので、我々は専ら DLA 的なコロニー・パターンを与える領域 A に注目していたのである。

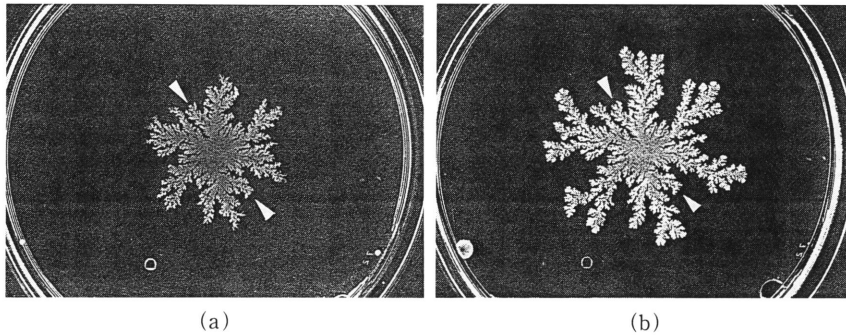


図2. 菌株の接種12日後 (a), 35日後 (b) のコロニーの成長の様子. $C_a=10\text{ g/l}$, $C_n=1\text{ g/l}$. 三角マークで例示されているように, 外に伸びだした枝が内枝の成長を抑制する遮蔽効果をはっきり見られる.

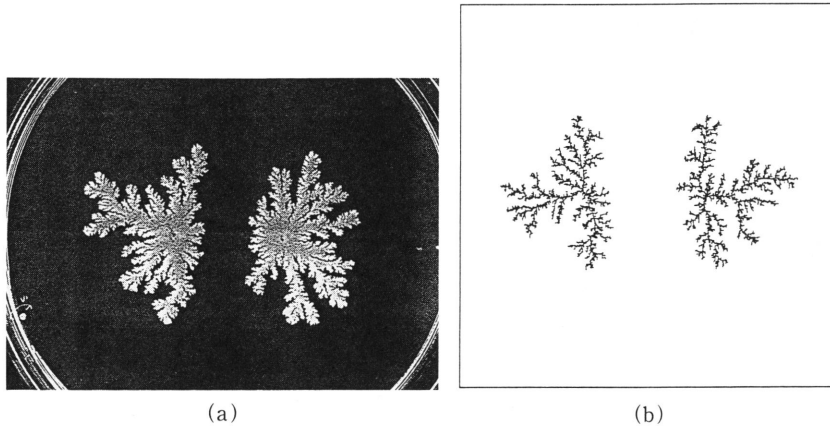


図3. (a) 2点に同時に菌株を接種し, 1カ月間培養したコロニー・パターン. $C_a=10\text{ g/l}$, $C_n=1\text{ g/l}$. (b) 2個の種粒子からのDLAクラスターの成長の計算機シミュレーション. 総粒子数 $N=10,000$. 2個のコロニーあるいはDLAクラスターが互いに反撥しながら成長している様子がよく似ている.

まず寒天濃度 C_a をほぼ固定しておいて, 養分濃度 C_n を増してみる. つまり寒天板は硬めのまま, 養分の豊富な領域 B に移動するわけである. このとき, C_n の増大につれてコロニーの枝が次第に太くなり, ついにはコロニー内部がほぼ密に詰まっていて表面が比較的粗い構造のコロニー・パターンが得られた (領域 B). また, コロニーの成長がかなり速くなり, 5日間で大きさ5 cm 位に成長する. このような特徴は, 次の Eden モデルの結果と一致する.

Eden モデル (Family and Vicsek ed. (1991)) は癌・腫瘍などの成長を記述するために提案されたモデルである. それが生成するクラスターそのものは密であって, 自己相似フラクタルではない. しかし, このモデルは反応律速成長のプロトタイプ・モデルであるという意味で, それの与える Eden パターンは DLA パターンと同様, 自然界に見られる普遍的なパターンの一つとみてよい.

C_n を低いままに保って, C_a を少し下げ, 寒天板を少し軟らかくしてみる (領域 E). 今度は一変して, コロニーの成長が非常に速くなり, 1日で大きさ5 cm 位に成長する. それとともに, 密集した枝別れからなる外形 (輪郭) のスムーズな, いわゆる DBM (dense-branching mor-

phology) (Sawada et al. (1986), Grier et al. (1986)) 的なパターンが得られた. その一例が図5に示してある. このような DBM パターンは, 金属葉や樹枝状結晶成長, ヴィスカスフィンガリング等にも見られ, やはり普遍的なパターンの一つである. しかしその生成機構はまだはっきりしていない.

次に領域 E から C_n を増して, 領域 C に入る. この領域では, 枝別れの様子は領域 E でのそれと同じだが, 外形が DLA あるいは Eden クラスタとよく似た粗い構造のコロニー・パターンが得られた. また, 成長速度は領域 E とほぼ同じであった.

C_a の低い (寒天の軟らかい) 広い領域 D ではコロニーの成長が更に速くなり, 15 時間で 5 cm 位の大きさに成長する. そのパターンは透明で, 一様に広がった単純な構造である. これは領域 E の DBM 的なパターンの密集した枝が互いに融合してできたものとみてとれる.

5. 細胞の運動の効果

領域 A から B へのパターン変化がゆっくりしているのに比して, A から E へのそれは急激で, 成長も格段に速くなっている. これは A から E では成長の仕方そのものが変化したためであろう. これを確認するために, コロニーの成長しつつある部分を光学顕微鏡で観察してみた. 領域 A, B では, バクテリアは単純に発育・分裂を繰り返すだけで, 個々の細胞の運動は認められなかった. ところが驚いたことに, 領域 E では個々のバクテリア細胞がコロニーの枝内で活発に動き回っているのである. この枯草菌は大腸菌やサルモネラ菌などの桿菌と同様, 細胞表面に複数の鞭毛 (flagella) を持ち, これをうまく同期して回転させ, 水中を動き回ることができる. しかしそれにしても, 極度に粘っこいはずの寒天表面をどうして自由に動き回ることができるのであろうか.

ともかく, 領域 E で得られたコロニーの成長しつつある枝の先端近傍を拡大して観察してみると, 動きの鈍いバクテリア細胞が 2, 3 層寄り添って枝の外壁を構成し, その内部で個々の細胞が活発に動き回っている. とどろき細胞は壁にぶつかってそれを突き破り外にはみ出すが, 直ちに動きが止まってしまう. しかし結果として壁は幾分前進し, 枝が成長する. その成長は領域 A や B でのそれよりはるかに速い.

このようなコロニーの成長の仕方は領域 C, D でも観察された. 図4のほぼ縦に引かれた破線が細胞の運動の有無の境界を表している. これを見ると, 細胞運動の発現がコロニー・パター

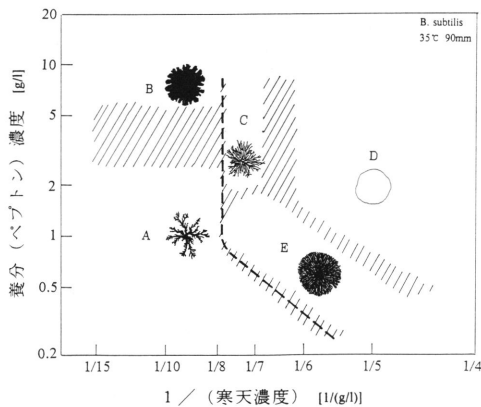


図4. 枯草菌 (*B. subtilis*; 野生株) コロニーの環境条件によるパターン変化.

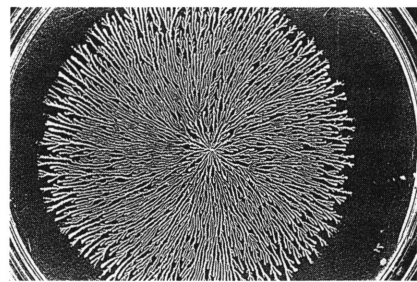


図5. 図4の領域Eで得られるDBM的なコロニー・パターンの例. $C_a=6\text{ g/l}$, $C_n=0.5\text{ g/l}$ の培地で2日間培養.

ンの変化をトリガーしているようにみえる。これを確認するために、我々は鞭毛のない（従って動き回ることができない）変異株を野生株から分離・増殖し、これを使って同様な実験を行った。その結果は領域 C, D, E が消え、領域 A, B だけが図 4 の全域にわたって観察された (Ohgiwari et al. (1992))。従って、確かに細胞の運動がコロニー・パターンの変化を誘起していると考えられる。

6. おわりに

単純な単細胞生物とはいえ、生き物であるバクテリアのコロニー形成が物理的なモデルである DLA によってどうしてこのようにすっきりと説明できたのだろうか。養分が拡散場あるいはラプラス場を作るのは当然として、ここでは DLA のもう一つの重要な要素である局所的な成長機構が問題である。本来の DLA ではブラウン粒子がクラスター表面に到達すればそこに付着するという単純なルールで成長したが、この条件を変えるとパターンも変わる (Meakin (1988), Matsushita (1990))。例えば、クラスターの表面に到達した粒子が、近くの表面点をしばらく動き回ってより安定な位置を見つけてから落ち着くというようにルールを変えると、クラスターの枝が太くなる。これは表面張力の原始的なモデルと考えることができる。しかしこの場合には、枝の太さよりも大きなスケールで再び DLA の特徴が現れる。なぜなら、表面張力は枝の太さ以下のスケールで DLA に影響を与え得るに過ぎず、それ以上のスケールでは、特徴的な長さがラプラス場がないことに由来する DLA の自己相似性が影響を受けないからである。結果として、枝の太さを単位にしたような DLA クラスターが得られることになる。

バクテリアがコロニーを形成すること自体、彼らは培地界面上で集合する傾向があることを意味する。従って、コロニーの実効的な表面張力を考えることができる。観測されたコロニーの枝の太さはこれに由来するのであろう。実験では理想的な低濃度は実現できないので、養分の濃度が有限であることも枝の太さに効いているのかも知れない。桿菌である枯草菌は単純な単細胞形をしており、単純に分裂・増殖を繰り返すだけで、枝の太さ以外にコロニー・パターンに現れるような増殖の特異性が余りないのではなかろうか。実際、同じく桿菌である大腸菌 (*Escherichia coli*) やネズミチフス菌 (*Salmonella typhimurium*) なども寒天が硬めで養分濃度の低い拡散律速的な条件の下では DLA 的なコロニー・パターンを形成することがわかってきている (Matsuyama and Matsushita (1992))。

逆に言えば、拡散律速的な条件下の成長であるにもかかわらず DLA とは大きく異なったコロニー・パターンが得られたとすると、これこそ生物固有の特徴がコロニーに反映した結果とみることができるのではなかろうか。この点に物理と生物が協力し合える今後の発展の一つの方向があるように思われる。

前述のように、図 4 の領域 B でのコロニー・パターンは Eden 的である。もし、それが本当に Eden モデルで説明できるのなら、パターン表面の粗さは自己アフィンであるはずである (Family and Vicsek ed. (1991))。即ち、成長方向とそれに垂直な方向では表面の粗さの変化が、異なったスケーリング指数で異方的にスケールされる。このことを枯草菌、大腸菌で確認したという報告 (Vicsek et al. (1990)) もあるが、この点については、より詳細な研究が必要であろう。他方、領域 E で見られるような DBM パターンの成長機構は、金属葉など他の系と同様に、依然として謎である。しかし、この問題もここで述べたバクテリアの振舞いから、いくらか手がかりが得られてきたように思われる。この点も今後に残された興味深い研究課題であろう。

他にも、リーゼガング・リング⁵⁾に酷似したコロニー・パターンを示す菌種 (*Proteus vulgaris* 等) がある。また、ごく最近、大腸菌のある変異株がひまわりの種の並びに類似した点

状のコロニー・パターンを形成することを示した報告 (Budrene and Berg (1991)) が現れた。当然興味が尽きそうにない。

本研究は扇割正浩 (中大理工), 松山東平 (新潟大医), 藤川 浩 (都衛生研) の各氏との共同研究の成果をまとめたものであることを記し, 謝意を表する。

注

- 1) 金属葉 (metal-leaf): 硫酸亜鉛などの電解質溶液の界面に陰極を接触させ, 周囲の陽極との間に直流電圧を印加する時に陰極から界面に沿って2次元的に生じる葉状の金属電析物。
- 2) リヒテンベルク図 (Lichtenberg's figure): 写真乾板を金属板にのせて一方の電極とし, 感光膜の上面に別の針状電極を接触させ, 両極間に放電を起こさせて現像する時に得られる沿面放電のパターン。
- 3) ヴィスカスフィンガリング (viscous fingering): 粘性が異なり, 混合しない2流体 (水と空気など) をギャップの狭い平行平板間に保持し, 低粘性の流体に圧力を加えて高粘性流体を押し出す時に生じる2流体界面の不安定現象。濡れた2枚のガラス板を無理に引きはがした時に見られる樹状パターンがその卑近な例。
- 4) ボックスカウント法 (box-counting method): 自己相似性の簡易な判定法。与えられたパターンを一辺 ε のメッシュで覆い, パターンがのっているメッシュの数 $N(\varepsilon)$ を数える。 ε を変え (粗視化し) てみて $N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D}$ と表される時, そのパターンは自己相似と判定でき, D がそのフラクタル次元を与える。
- 5) リーゼガング・リング (Liesegang ring): 例えば, 少量の二クロム酸カリウムを仕込んだ寒天板上に濃厚な硝酸銀溶液を1滴落とすと, その周囲に二クロム酸銀の同心円状の沈澱が現れる。このように, 反応物の拡散と反応, 生成物の沈澱とが絡んで生じるリング状パターン。縞めのようなものもその例。

参 考 文 献

- Avnir, D. (ed.) (1989). *The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry*, Wiley, Chichester, U.K. の M. Matsushita (161-179), G. Daccord (183-197), H. Van Damme (199-226) の稿参照。
- Budrene, E.O. and Berg, H.C. (1991). Complex patterns formed by motile cells of *Escherichia coli*, *Nature*, **349**, 630-633.
- Family, F. and Vicsek, T. (eds.) (1991). *Dynamics of Fractal Surfaces*, World Scientific, Singapore.
- フェダー, J. (1991). 『フラクタル』 (松下 貢・早川美徳・佐藤信一 訳), 啓学出版, 東京。
- Fujikawa, H. and Matsushita, M. (1989). Fractal growth of *Bacillus subtilis* on agar plates, *J. Phys. Soc. Japan*, **58**, 3875-3878.
- Fujikawa, H. and Matsushita, M. (1991). Bacterial fractal growth in the concentration field of nutrient, *J. Phys. Soc. Japan*, **60**, 88-94.
- Grier, D., Ben-Jacob, E., Clarke, R. and Sander, L.M. (1986). Morphology and microstructure in electrochemical deposition of zinc, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1264-1267.
- Matsushita, M. (1990). Diffusion-limited aggregation and related problems, *Formation, Dynamics and Statistics of Patterns*, Vol.1 (eds. K. Kawasaki, M. Suzuki and A. Onuki), 158-203, World Scientific, Singapore.
- Matsushita, M. and Fujikawa, H. (1990). Diffusion-limited growth in bacterial colony formation, *Physica A*, **168**, 498-506.
- Matsuyama, T. and Matsushita, M. (1992). Self-similar colony morphogenesis by gram-negative rods

- as the experimental model of fractal growth by a cell population, *Applied and Environmental Microbiology*, **58**, 1227-1232.
- Meakin, P. (1988). The growth of fractal aggregates and their fractal measures, *Phase Transitions and Critical Phenomena*, Vol. 12 (eds. C. Domb and J.L. Lebowitz), 335-489, Academic Press, New York.
- Ohgiwari, M., Matsushita, M. and Matsuyama, T. (1992). Morphological changes in growth phenomena of bacterial colony patterns, *J. Phys. Soc. Japan*, **61**, 816-822.
- Sawada, Y., Dougherty, A. and Gollub, J. (1986). Dendritic and fractal patterns in electrolytic metal deposits, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1260-1263.
- シングルトン, P., セインズブリー, D. (1982). 『細菌学入門』(中谷林太郎・岡村 登 訳), 啓学出版, 東京.
- ヴィチェック, T. (1990). 『フラクタル成長現象』(宮島佐介 訳), 朝倉書店, 東京.
- Vicsek, T., Cserzo, M. and Horvath, V.K. (1990). Self-affine growth of bacterial colonies, *Physica A*, **167**, 315-321.
- Witten, T.A. and Sander, L.M. (1981). Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon, *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 1400-1403.

生物時系列データのカオス力学系的解析

麻布大学 教養部 永 井 喜 則

Abstract. We examine whether time series data have certain chaotic feature or not. For this purpose, we firstly reconstructed attractors followed by Takens' embedding method for one-dimensional time series data. After this construction, a Poincaré section was made. If there exists some deterministic mechanism, some function is obtainable by making return mapping on the Poincaré section. A characterizing of chaos is what the reconstructed attractor has a positive maximum Lyapunov number. To test this nature, estimation of maximum Lyapunov number by Sano's method (1978, *Progr. Theoret. Phys.*, **77**, 1-5) was done. Examples are shown for a mouse's behavior data which were measured to administer scopolamine to the mouse. This is collaborated with Y. Takamoto (Sapporo Beer Corporation).

決定論的な方程式の解にでたらめに見える不規則な結果が現れることがある。このような現象をカオスという。カオスという現象が見つかったので、でたらめに見える時系列データの中にも決定論(因果律)が潜んでいることが期待される。こういう期待を抱いて生物時系列データを解析するのが本研究の目的である。

F. Takens は力学系のつくるマニホールドが滑らかならば、高自由度力学系のひとつの変数だけを使ってもとの力学系のある種の統計的性質を保存してマニホールドを再構築できることを示した (Takens (1981)). この Takens の仕事は、もともとの力学系のつくるマニホールドが滑らかであるか否かに拘らず、測定された時系列データからマニホールドを再構築してその性質を研究し、時系列データの背後にある力学系のカオス性を検討してみるという好奇心を誘うものである。ここでは、Takens の方法によって再構築されたマニホールドをアトラクターと呼ぶことにする。

再構築されたアトラクターから時系列データの性質を考えるいくつかの方法を説明する。カオス力学系の観点から時系列データを解析する場合には、これらの方法のそれぞれの観点から