

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2009

課題番号：18340115

研究課題名（和文） ランダムな成長パターンの形成機構

研究課題名（英文） Formation Mechanism of Growing Random Patterns

研究代表者

松下 貢 (MATSUSHITA MITSUGU)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：20091746

研究成果の概要（和文）：

自然界、社会に見られるランダムなパターンの構造と統計について主として三つの課題を研究した。1. 大腸菌と緑膿菌について環境条件を変えるとコロニーパターンがどのように変化するかのダイアグラムを確立し、そのうちの周期パターンの菌密度変化を詳しく調べた。2. ランダムパターンの成長界面の自己アフィンフラクタル性を、バクテリアコロニー、地形などを例にして詳しく調べた。3. 都道府県人口、市町村人口、私たちの身長・体重などを例にして、複雑系一般の統計性の基本は対数正規分布であることを基礎づけた。

研究成果の概要（英文）：

We have mainly studied three topics on universal structural and statistical properties of random patterns seen in nature and our society. 1. We have established morphological diagrams on how colony patterns of bacterial species *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa* change when environmental conditions vary. We have also studied the spatiotemporal change of cell density when periodic colony growth occurs. 2. We have investigated scaling properties, especially self-affinity, of growing interface of random patterns, by taking bacterial colonies and real landscapes as examples. 3. We have laid the foundation that the fundamental statistical aspects seen in complex systems in general are described by lognormal distributions, based on our observations of prefectural and municipal populations, our body height and weight, and so on.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,200,000	0	6,200,000
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	10,500,000	1,290,000	11,790,000

研究分野：統計物理学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：パターン形成、バクテリア、コロニー、スケーリング、フラクタル、複雑系、対数正規分布

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境条件によるバクテリアコロニーのパ

ターン変化については、私たちの枯草菌の場合の詳細な研究があり、プロテウス菌やセラ

チア菌にも拡張し、それぞれの場合のモルフォロジーダイアグラムを確立してきた。フラクタルなコロニーの形成機構はこれまでの研究で分かっていたが、周期的な成長でできる同心円状コロニーな度の成長機構は未解決であった。

(2) バクテリアコロニーや紙・布の濡れなど、ランダムなパターンでの成長界面の自己アフィン性の実験結果はバラバラであり、そのダイナミクスとの整合性もないように見え、統一に欠けていた。

(3) ゲル中の結晶成長は伝統的には成長界面のフラットなファセット成長を目的に行われてきた。

## 2. 研究の目的

(1) 大腸菌と緑膿菌についてもモルフォロジーダイアグラムを作成し、特に周期的に成長してできる同心円状コロニーについて、菌密度の時間空間的变化を測定してその成長機構を探る。

(2) ランダムなパターンでの成長界面の自己アフィン性と成長ダイナミクスを整合的に記述するダイナミックスケリング法を整理・確立し、いろいろな実験系に適用する。

(3) ゲル内結晶成長に関して、ゲルの固さ柔らかさを制御すると結晶成長の拡散長を大幅に変えられることに注目して、通常の水溶液などの液体用倍では得られない結晶成長のモルフォロジーを実現する。

## 3. 研究の方法

(1) 成長パターンのマクロな観察と解析：あらかじめ指定された濃度の栄養分と寒天を仕込んで用意された寒天培地上に試料バクテリアを接種し、培養する。グローバルなコロニーパターンの成長や変化を記録・解析し、モルフォロジーダイアグラムを作成する。特に、同心円状コロニー成長の周期、遊走期、停止期の栄養濃度と寒天濃度（培地の固さ）依存性を詳しく測定する。

寒天ゲルやゼラチンゲルなどを媒質として、塩化ナトリウム (NaCl) などの溶質に対して、溶質濃度とゲル濃度（ゲルの固さ）をパラメータとして成長するマクロな結晶パターンのモルフォロジーダイアグラムを確立する。このゲル中結晶成長の実験によって成長するランダムパターンの多彩さをチェックするとともに、この方法の有用さを確かめる。

(2) 成長パターンのセミマクロな観察と定量化：セミマクロな観察はパターン形成において、中間的なスケールで何が起きているのかを知る上で重要であり、現象のモデル化に寄与をする。具体的には、適当な基準からの

成長パターンの高さの空間的・時間的变化を共焦点レーザー顕微鏡で測定・記録する。また、アスコルビン酸やバクテリアがパターンを形成する詳細な様子を、焦点深度の大きいデジタルマイクロスコープに低倍率のズームレンズをつけて観察・記録する。

## 4. 研究成果

(1) バクテリアコロニーのモルフォロジーダイアグラムの確立と個々のモルフォロジーの成長の記録・解析は私たちの研究が世界的に見ても独壇場である。今回の研究期間で大腸菌と緑膿菌についてそのモルフォロジーダイアグラムを確立した。

数年前に私たちの研究室で、セラチア菌、大腸菌が、それ以前から知られていたプロテウス菌、枯草菌と同様、ある条件下で周期的な同心円状コロニーを形成することを見出した。今回さらに、緑膿菌も適当な条件下で同心円状のコロニーを形成することを見出した。これは、適当な条件下ではバクテリアは種の違いによらずかなり普遍的に、遊走期と停止期を周期的に繰り返して同心円状のコロニーを形成することを示唆している重要な結果である。

大腸菌とプロテウス菌について、それぞれの周期的コロニー成長の際の時間空間的な菌密度変化の測定を共焦点レーザー顕微鏡を用いて詳しく行った。その結果は学会発表を済まし、論文にまとめている。

大腸菌ではコロニー形成に走化性が重要だということが世界的に定説になっている。しかし、私たちは走化性を持たない変異株を使っても野生株と同じコロニーのモルフォロジーダイアグラムを得た。これはコロニー形成に走化性が効かないことを示しており、従来の定説を否定する実験結果であり、学会発表をすませて論文にまとめている。

枯草菌の細胞サイズの分布を詳しく調べたところ、ガウス分布ではなく、対数正規分布であることを見出した。これは次項との関連で興味深い発見であり、学会発表をすませ、論文投稿の準備を進めている。

(2) ランダムなパターンでの成長界面の自己アフィン性と成長ダイナミクスを整合的に記述する拡張されたダイナミックスケリング法を確立し、バクテリアコロニーの成長界面や紙の濡れ界面などの実験系に適用した。その結果、これまでの一貫しなかったいろいろなデータが整合性よく整理できるようになった。

(3) 自然界、社会に見られる系はほとんど例外なく複雑系である。複雑系での統計性はべき乗分布と対数正規分布で特徴づけられることが多い。しかし、私たちは、複雑系では対数正規分布がより基本的な分布関数であ

ることを基礎付けし、多くの例を提示してきた。さらに、市町村人口分布の時間変化に見られる特徴を明らかにした。また、ガウス分布の典型とされてきた私たちの身長分布でさえ、対数正規分布がよりよいことを見出した。一方、体重の場合は対数正規分布がはるかによくフィットすることを見出した。

食品の消化の第一歩は口内で食品をかみ砕くことである。私たちは生人参を例にかむ回数を固定してかみ砕かれた人参の破片のサイズ分布を調べたところ、従来、ワイブル分布とされてきたが、対数正規分布がはるかによくフィットすることを見出した。

(4) ゲル内結晶成長に関しては炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) について実験を行い、私たちの予想が正しいことを確認し、最近、学会発表を行った。ゲルの固さ柔らかさを制御することによる拡散長の大幅な変化を通じての結晶成長のモルフォロジー変化を実現するという私たちの当初の目標に向けて、さらにいろいろな物質について結晶成長を試みなければならない。

アスコルビン酸 (ビタミンC) の準2次元結晶成長の際に見られる同心円状パターンについて、その成長ダイナミクスの詳しい定量的観察を行って、成長機構のモデル化を試みた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① Hiroto Kuninaka, Yu Mitsuhashi and Mitsugu Matsushita, “Statistical Properties of Height of Japanese Schoolchildren”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 78, pp. 125001-1-2, 2009, 査読有.
- ② Rie Tokita, Takaki Katoh, Yusuke Maeda, Jun-ichi Wakita, Masaki Sano, Tohey Matsuyama and Mitsugu Matsushita, “Pattern Formation of Bacterial Colonies by *Escherichia coli*”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 78, pp. 074005-1-6, 2009, 査読有.
- ③ 國仲 寛人、松下 貢、“複雑系の統計性”、科学 Vol. 79, pp. 1146-1155, 2009, 査読無.
- ④ Hiroto Kuninaka and Mitsugu Matsushita, “Why Does Zipf’s Law Break Down in Rank-Size Distribution of Cities?”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 77, 2008, pp. 114801-1-6, 査読有.

⑤ Chihiro Takahashi, Takashi Nozawa, Taichiro Tanikawa, Yoji Nakagawa, Jun-ichi Wakita, Mitsugu Matsushita and Tohey Matsuyama, “Swarming of *Pseudomonas aeruginosa* PA01 without differentiation into elongated hyperflagellates on hard agar minimal medium”, FEMS Microbiology Letters, Vol. 280, pp. 169-175, 2008, 査読有.

⑥ Yoshihiro Yamazaki, Kazuaki Saito, Naoki Kobayashi, Tatsuya Ozawa and Mitsugu Matsushita, “Reconstruction and Extension of the Family-Vicsek Scaling Hypothesis for Growing Rough Interfaces”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 76, pp. 104002-1-9, 2007, 査読有.

⑦ Yo Sasaki, Hiroto Kuninaka, Naoki Kobayashi and Mitsugu Matsushita, “Characteristics of Population Distributions in Municipalities”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 76, pp. 074801-1-6, 2007, 査読有.

⑧ Naoki Kobayashi, Kaoru Kohyama, Yo Sasaki and Mitsugu Matsushita, “Statistical Laws for Food Fragmentation by Human Mastication”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 75, pp. 083001-1-4, 2006, 査読有.

⑨ Yo Sasaki, Naoki Kobayashi, Shunji Ouchi and Mitsugu Matsushita, “Fractal Structure and Statistics of Computer-simulated and Real Landforms” J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 75, pp. 074804-1-4, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 39 件)

① 吉野哲雄、江原幸枝、殿村幸彦、時田理恵、加藤高基、前多祐介、脇田順一、佐野雅己、松山東平、松下 貢、“大腸菌コロニーの周期的成長パターン (2)” 日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日、岡山大学.

- ② 江原幸枝、吉野哲雄、殿村幸彦、時田理恵、加藤高基、前多祐介、脇田順一、松山東平、佐野雅己、松下 貢、“大腸菌コロニーの形態形成における走化性の影響” 日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山大学.
- ③ 殿村幸彦、江原幸枝、吉野哲雄、脇田順一、松山東平、松下 貢、“*P. mirabilis*の同心円状パターン” 日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月26日、熊本大学.
- ④ 小谷野真利子、脇田順一、松山東平、松下 貢、“緑膿菌コロニーのパターン形成” 日本物理学会第64回年次大会、2009年3月30日、立教大学.
- ⑤ 三橋 雄、國仲寛人、松下 貢、“身長及び体重に見られる統計分布の特徴 II” 日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、立教大学.
- ⑥ 山崎義弘、戸田昭彦、松下 貢、脇田順一、“アスコルビン酸の結晶成長界面で観られるフラクタル的な衝突について” 日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、岩手大学.
- ⑦ 飯島徹也、國仲寛人、松下 貢、“バクテリアコロニーの界面の粗さの定量解析” 日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、岩手大学.
- ⑧ 時田理恵、加藤高基、前多祐介、脇田順一、佐野雅己、松山東平、松下 貢、“大腸菌コロニーのパターン形成(2)” 日本物理学会第63回年次大会、2008年3月22日、近畿大学本部キャンパス.
- ⑨ 脇田順一、松山東平、松下 貢、“*B. subtilis* ディスク状コロニーの微視的観察” 日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学.
- ⑩ 佐々木陽、小林奈央樹、國仲寛人、松下 貢、“市町村別人口に見る人口分布の特徴” 日本物理学会2007年春季大会、2007年3月18日、鹿児島大学.
- ⑪ 山崎義弘、小林奈央樹、齋藤和亮、小澤達哉、松下 貢、“成長する界面の粗さに対するスケーリング: Family-Vicsek scalingの拡張・再構築” 日本物理学会2007年春季大会、2007年3月18日、鹿児島大学.
- ⑫ 小林奈央樹、神山かおる、佐々木陽、松下 貢、“咀嚼による食品破壊の統計則—対数正規分布への再訪” 日本食品工学会第7回年次大会、2006年8月3日、つくば国際会議場 (エポカルつくば).

〔図書〕(計3件)

- ① 松下 貢, 袁華房 “物理学講義 熱力学”, 2009年, 178ページ.
- ② 松下 貢, (株) エヌ・ティー・エス, “トポロジーデザイン—新しい幾何学からはじめる物質・材料設計—” ((有) ブッカーズ編集、第5編、第1章 (フラクタル幾何学の基礎) を担当), 2009年, 20ページ.
- ③ 松下 貢, 松山東平, (株) エヌ・ティー・エス, “バイオフィルムの基礎と制御”, 第1編、第1章、第1節、2項 (“バイオフィルム形成に見られる多細胞的振る舞い” を担当), 2008年, pp.16-26.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/matusita/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松下 貢 (MATSUSHITA MITSUGU)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20091746

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

香取 眞理 (KATORI MAKOTO)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 60202016

田口 善弘 (TAGUCHI YOSHIHIRO)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 30206932

松山 東平 (MATSUYAMA TOUHEI)  
新潟県立大学・専攻科 食物栄養専攻・非常勤講師  
研究者番号: 00047200

須田 淳一郎 (SUDA JUNICHIRO)  
佐世保工業高等専門学校・一般科目・教授  
研究者番号: 40226577

山崎 義弘 (YAMAZAKI YOSHIHIRO)  
早稲田大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 10349227