

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月16日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540399

研究課題名（和文） 複雑系の構造、統計とダイナミクス

研究課題名（英文） Structure, Statistics and Dynamics of Complex Systems

研究代表者

松下 貢 (MATSUSHITA MITSUGU)

明治大学・先端数理科学研究科・講師

研究者番号：20091746

研究成果の概要（和文）：多岐にわたる複雑系に共通して見られる構造、統計とダイナミクスについて主として三つの課題を研究した。1. 各種バクテリアのコロニーの特徴的な構造と成長ダイナミクスについて詳しい実験的考察を行った。2. 複雑系では対数正規分布が基本的な分布関数であることを基礎付けし、多くの例を示すとともにその社会科学的意味を明らかにした。3. 宇宙背景放射温度揺らぎのWMAPデータについて、温度揺らぎを地形の高低とみなし、そのフラクタル性を見出した。

研究成果の概要（英文）：We have mainly studied three topics on structural, statistical and dynamical properties commonly seen in various complex systems in nature and our society. 1. We have studied characteristic structure and growth dynamics of colonies of various bacterial species. 2. We have elucidated that in complex systems in general, fundamental distribution is log-normal. We have shown many examples of lognormal distributions in various sociological phenomena and tried to explain their sociological meaning. 3. Concerning the WMAP data on cosmic microwave background (CMB), we have first considered the temperature fluctuations as topographical variation and found the fractal properties.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：複雑系、バクテリアコロニー、ゲル内結晶成長、対数正規分布、社会物理学、フラクタル

1. 研究開始当初の背景

(1) バクテリアコロニーの環境条件によるパターン変化については、私たちの枯草菌やプロテウス菌の場合の詳細な研究があり、セラチア菌や大腸菌、緑膿菌にも拡張し、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どの成長機構は未解決であった。

(2) 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。

(3) 自然科学、社会科学を問わず、複雑な系の統計性は注目する統計量の分布の裾だけに限定し、それをべき乗分布で特徴付けることがほとんどであった。

(4) 宇宙背景放射の温度揺らぎデータは WMAP により非常に精密になってきた。その解析には伝統的に素粒子論的宇宙論を基礎になされているが、統計物理学的考察はほとんどなされていない。

2. 研究の目的

(1) 枯草菌、大腸菌と緑膿菌について、周期的に成長してできる同心円状コロニーに対する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) 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溶媒では得られない結晶モルフォロジーを実現し、その成長機構を探究する。

(3) 複雑系を構成するメンバーに共通する特性が相互作用しながら継時的に変化して行くその歴史性にあることに注目し、その場合の特徴的な統計性を考察する。

(4) 宇宙背景放射の温度揺らぎについての WMAP データを、統計物理学を基礎にして解析し、新しい知見を追求する。

3. 研究の方法

(1) 成長パターンのマクロ及びセミマクロな観察と定量的解析：

① 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。

② 寒天ゲルやゼラチンゲルなどを媒質として、炭酸カルシウム (CaCO_3) 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。この結晶成長の実験によってゲル中で成長する結晶モルフォロジーの多彩さを

チェックするとともに、この方法の有用さを確かめる。

③ 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、現象のモデル化に必須である。実験的には、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。

(2) 複雑系の統計解析：複雑系は自然界、社会にわたって遍く存在する。あまりに多彩であるために、その普遍的な特徴を調べるにはまず統計性に焦点を絞るべきと考える。具体的には、注目する複雑系のある特性量（例えば市町村の人口など）がどのような統計則に従い、どのように時間変化をするかを詳しく調べ、その意味付けを試みる。

(3) 宇宙背景放射の温度揺らぎの統計物理学的考察：宇宙背景放射の WMAP データのフラクタル性を詳しく解析し、統計物理学的な意味付けを試みる。

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。数年前に私たちの研究室で、セラチア菌、大腸菌、緑膿菌が、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。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。今後もこれを確認する実験・観察を続けるべきである。

① 枯草菌と緑膿菌について、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。

② 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重要な実験結果であり、国際会議で発表を行った。

③ 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、論文にまとめて発表した。

(2) 自然界や社会に見られるほとんどの系は複雑系である。複雑系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、私たちはこれまでの研究で、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た上で、多くの具体例を示してきた。たとえば、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、成長期にある児童生徒の場合には対数正規分布がよりよいことを見出した。さらに、体重の場合にはガウス分布は問題外であり、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。これらの結果は学会発表だけでなく、個別の論文や和文・欧文の総説で詳しく紹介した。複雑系は多彩なので、今後もこの方向で研究を続けなければならない。

(3) 宇宙背景放射の温度揺らぎの WMAP データについて、温度揺らぎの大小を地形の高低とみなし、一定温度の水平面でこの地形を切断すると、等高線ループの集まりのパターンが得られる。このパターンのフラクタル性をチェックし、水平面の高度を変えた時のパーコレーション転移の性質を詳しく考察し、通常の場合のパーコレーションとの違いを明らかにした。これらの興味深い結果は学会発表だけでなく、論文にも発表した。これを契機に統計物理学的宇宙論ともいうべき分野を作っていくべきであろう。

(4) 結晶成長：

① ゲル内結晶成長に関しては炭酸カルシウム (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、学会発表を行った。ただし、さらに多くの物質について確認実験をしなければならない。

② 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、学会発表を行った。

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 6 件)

① Hiroto Kuninaka and Mitsugu Matsushita,

“Statistical properties of complex systems - lognormal and related distributions”, *Let's Face Chaos through Nonlinear Dynamics*, AIP Conf. Proc. 1468, pp. 241 - 251, 2012, 査読有。

② Naoki Kobayashi, Hiroto Kuninaka, Jun-ichi Wakita and Mitsugu Matsushita, “Statistical Features of Complex Systems - Toward Establishing Sociological Physics -”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 80, 072001-1-13, 2011, 査読有。

③ Naoki Kobayashi, Yoshihiro Yamazaki, Hiroto Kuninaka, Makoto Katori, Mitsugu Matsushita, Satoki Matsushita and Lung-Yih Chiang, “Fractal Structure of Isothermal Lines and Loops on the Cosmic Microwave Background”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 80, 074003-1-5, 2011, 査読有。

④ Jun-ichi Wakita, Hiroto Kuninaka, Tohey Matsuyama and Mitsugu Matsushita, “Size Distribution of Bacterial Cells in Homogeneously Spreading Disk-like Colonies by *Bacillus subtilis*”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 79, pp. 094002-1-6, 2010, 査読有。

[学会発表] (計 27 件)

① 山崎義弘、戸田昭彦、脇田順一、菊池光修、石井秀弥、松下 貢、“薄膜状になったアスコルビン酸溶液の流動性と周期的結晶成長” 日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 29 日、広島大学。

② 有馬美奈、熊田龍人、脇田順一、松山東平、松下 貢、“緑膿菌コロニーの周期的成長パターン” 日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 29 日、広島大学。

③ 國仲寛人、松下 貢、“児童の身長に見られる統計分布と乗算成長モデル” 日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学。

④ 樋口真哉、小林奈央樹、脇田順一、山崎義弘、國仲寛人、香取眞理、松下 貢、松下聡樹、Lung-Yih Chiang、“宇宙マイクロ波背景放射のパーコレーション解析” 日本物理学会第 67 回年次大会 (西宮上ヶ原キャンパス、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学)。

⑤ 小林奈央樹、山崎義弘、國仲寛人、香取眞理、松下 貢、松下聡樹、Lung-Yih Chiang、“宇宙マイクロ波背景放射上の等温線ループ集団のフラクタル構造” 日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 27 日、新潟大学。

[図書] (計 2 件)

① トム・ガリー、松下 貢、“英語で楽しむ寺田寅彦” (岩波科学ライブラリー 203),

2013年, 122 ページ.

②松下 貢, 裳華房 “物理学講義 力学”,
2012年, 219 ページ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下 貢 (MATSUSHITA MITSUGU)

明治大学・先端数理科学研究科・講師

研究者番号: 20091746

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

山崎 義弘 (YAMAZAKI YOSHIHIRO)

早稲田大学・理工学部・教授

研究者番号: 10349227

國仲 寛人 (KUNINAKA HIROTO)

三重大学・教育学部・准教授

研究者番号: 70402766