

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9日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560058

研究課題名（和文）階層複雑系におけるフラクタル性発現機構の解明とフラクタル・デザイン

研究課題名（英文）Fractal formation mechanism in hierarchically complex systems and fractal design

研究代表者

矢久保 考介（YAKUBO KOUSUKE）

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40200480

研究成果の概要（和文）：

本研究では、異なる階層の複雑系において発現するフラクタル性に対し、(1)構造揺らぎの統計的性質における普遍性の抽出とその起源の統一的理解、(2)フラクタル構造形成の機構解明、(3)これらの知見を基礎とした機能性フラクタル構造体の理論的デザインを行った。特に、マクロな古典系からナノスケール量子系、さらにはユークリッド距離が定義されない複雑ネットワークに至るまで、階層を超えたフラクタル系が普遍的に示す構造揺らぎの統計的性質を系統的に研究した。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we have studied theoretically the fractality appearing in several hierarchical levels of complex systems. This study involves (1) clarifying universal properties in structural fluctuations and their origins, (2) understanding formation mechanisms of fractals, and (3) designing theoretically functional fractal structures. In particular, statistical properties of fractal systems in different scales, from macroscopic classical systems to nanoscale quantum ones and complex networks with no Euclidean distance, have been systematically studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、工学基礎

キーワード：数理工学（数理的解析・計画・設計・最適化）

1. 研究開始当初の背景

系の一部と全体が自己相似な関係にあるフラクタル系は、自然界や社会の様々な構造において見ることができる。砕波効果を有するフラクタル海岸線のように、フラクタル構造を有する系は極めて高い機能性を示すことが知られており、フラクタル・アンテナやフラクタル光導波路、フラクタル

日よけなど、フラクタル性を恣意的に課した人工フラクタル構造が過去に提案されている。しかしながら、フラクタル構造は非常に複雑であるため、限定された物理スケール以外ではその人工的作成が困難である。実際、これまで開発された機能性フラクタル構造体の殆どは、人工的な操作が容易なスケールのものばかりであり、新奇機能が期待される量子力学的ナノ構造や複雑

ネットワーク系でのフラクタル構造作成は未だ成功例がない。その理由は、様々なスケールや階層におけるフラクタル系に共通した統計的性質の統一的理解と、その普遍的性質を再現する自己組織的フラクタル構造形成メカニズムの解明が不十分なためである。

2. 研究の目的

本研究では、異なる階層に属するフラクタル系に共通して見られる普遍的性質とその起源を解明することにより、多様なフラクタル系の構造形成メカニズムを統一的に理解するとともに、得られた知見を基礎として機能性フラクタル構造体を人工的に作成するための設計理論を確立する。複雑フラクタル系には階層を超えた共通の統計的性質があることはこれまでも指摘されているが、この普遍性がどの程度広範な階層の複雑系に対して成立するのか、どのような自己組織化過程でこの普遍性が発現するかなど、基本的問題が未解決のままである。本研究では、広域な階層に渡るフラクタル系をスーパーコンピュータを用いた大規模数値計算により調べ、自己組織化臨界現象の立場から俯瞰することで、これらの問題の解決を図る。本研究の遂行により、フラクタル量子デバイスやフラクタル複雑ネットワークなど、その実現が困難とされてきた系の人工構築が可能になれば、その工学的価値は計り知れない。例えば、インターネットの接続条件に何等かの制約・条件（ルール）を導入することでネットワーク構造を自己組織的にフラクタルにすることができれば、サイバー攻撃や破損に対して極めて堅牢な情報通信基盤が実現することになる。量子系やネットワーク系におけるフラクタル構造体の高い機能性を考慮すると、フラクタル構造形成メカニズムの理解に基づいた機能性フラクタル構造体のデザインは急務の課題である。

3. 研究の方法

本研究では、階層複雑系が示すフラクタル性と構造形成機構の統一的理解を目指す。この目的のため、まず初年度は本プロジェクトで遂行される多くの数値計算の基礎となる「超並列・超高速数値解析アルゴリズムの開発」を行う。また、古典的な非平衡プロセスで形成されるフラクタル系の構造揺らぎに関する統計的性質とそこに現われる普遍性の起源を明らかにする。次年度以降の研究においては、初年度に開発されたアルゴリズムを用いた大規模計算により、マルチフラクタル量子臨界状態および複雑ネットワーク系におけるフラクタル次元の揺らぎとフラクタル形成機構を研究し、初年度の結果と比較検討する。特に、異なる階層の複雑フラクタル系が共有する統計的性質が、形成メカニズムのどのような性質に起因しているのかを解明するための研究を行う。また、各階層でのフラクタル構造形成メカニズムの共通点から、系のフラクタル性が自己組織化されるための一般的条件を探る。さらに、この条件を基礎にして、新奇フラクタル材料とフラクタル・ネットワークのデザインに向けた研究を行う。

4. 研究成果

(1) 平成22年度には、まず本プロジェクトで遂行される多くの数値計算の基礎となる高速数値解析アルゴリズムの開発が行われた。従来の研究で我々が開発した「強制振動子法」をスピン軌道相互作用を扱うのに有利なように、四元数行列に対して拡張された。開発されたプログラムによって、従来の方法より数倍高速で固有値・固有ベクトルが計算できるようになった。

(2) 自己組織化臨界(SOC)メカニズムで形成される海岸線形成のシミュレーションを遂行し、そのフラクタル次元の揺らぎを計算した。この計算結果を、平衡臨界系での普遍分布として知られる一般化Gumbel分布、および以前我々が導いた三重指数関数分布と比較することで、代表的な非平衡フラクタル形成機構により成長する系の構造揺らぎが、平衡臨界系のフラクタル構造の揺らぎと同じ普遍クラスに属することが明らかとなった。

(3) スピン軌道相互作用を有する不規則量子系の電子状態のフラクタル性が調べられた。この系の金属・絶縁体転移点直上における臨界波動関数はマルチフラクタル性を有していることが知られているが、本研究では、秩序変数と相関次元のサンプル揺らぎの統計的性質を明らかにすべく、平成22年度に開発された計算アルゴリズムに基づく大規模数値計算が行われた。研究の結果、ナノスケール量子系においても、秩序変数の臨界揺らぎは一般化Gumbel分布に従い、相関次元は三重指数関数分布に従うことが明らかとなった。「ユークリッド距離が定義されない複雑ネットワークにおいても、次数分布が狭く指数的なテールを持つ場合には同じ揺らぎの性質を持つ」という我々の従来研究の結果と、(2)および(3)の結果とを考え合わせると、フラクタル構造の揺らぎはマクロな古典系、ナノスケール量子系、複雑ネットワーク系を問わず、同じ原理に支配されていることが示唆される。ただし、次数不均一性の強い(ベキ的な次数分布関数を有する)複雑ネットワークにおいては、普遍クラスが変わることも明らかとなった。本研究では、普遍クラスが不均一性の程度に依存する理由についても明らかにした。

(4) 現実の複雑ネットワークは、ノード数と平均ノード間距離とが対数的な関係をもつスモールワールド構造か、ベキ的な関係をもつフラクタル構造を取ることが知られている。これまでの研究では、これらの構造的特徴の差異は、構造を計測する方法の違いによるものであると解釈されてきた。しかしながら、本研究でパーコレーション臨界点における複雑ネットワーク構造を詳細に調べた結果、フラクタル性とスモールワールド性は、測定するスケールの違いによって生ずるものであり、同じスケールにおいて両者が共存することはないことを明らかにした。また、このようなスケールの違いによる構造的クロスオーバーは、ネットワーク上のダイナミクスにも反映される

ことを示し、動的クロスオーバーが単一の特徴的時間によってスケールされることを解明した。
(5) 航空路線網における乗降客数など、身の回りの複雑ネットワークにおけるエッジは、何等かの重みを有していることが多い。本研究では、重み付き複雑ネットワークの統計的性質を特徴付けるため、「メタウエイト」という量を提案した。この量の導入により、重みの強いエッジを重視するか、逆に軽視するかを連続的に調整することが可能となる。本研究では、メタウエイトを用いたクラスター係数やコミュニティ分割の方法を提案し、現実ネットワークの不均一性と機能との関係解明するための新しい方向性を示した。

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 24 件)

- (1) K. Yakubo and S. Mizutaka, Testing the Order Parameter of the Anderson Transition: Journal of the Physical Society of Japan (査読有) **81**, 104707:1-4 (2012), DOI=10.1143/JPSJ.81.104707.
- (2) H. Shima, Buckling of Carbon Nanotubes: A State of the Art Review: Materials (査読有) **5**, 47-84 (2012), DOI=10.3390/ma5010047.
- (3) H. Shima, S. Ghosh, M. Arroyo, K. Iiboshi and M. Sato, Thin-shell theory based analysis of radially pressurized multiwall carbon nanotubes: Comp. Mater. Sci. (査読有) **52**, 90-94 (2012), DOI=10.1016/j.commsci.2011.04.005.
- (4) S. J. Park, M. Sato, T. Ikeda and H. Shima, Hard-to-Soft Transition in Radial Buckling of Multi-Concentric Nanocylinders: World J. Mech. (査読有) **2**, 47-84 (2012), DOI=10.4236/wjm.2012.21006.
- (5) J. Onoe, T. Ito, S. I. Kimura, H. Shima, Y. Toda, H. Yoshioka, One-Dimensional Uneven Peanut-Shaped C60 Polymer: A Quantum Electronic System in Riemannian Space: Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures (査読有) **20**, 1-16 (2012), DOI=10.1080/1536383X.2011.586618.
- (6) S. Furuya and K. Yakubo, Multifractality of complex networks: Physical Review E (査読有) **84**, 36118:1-4 (2011), DOI=10.1103/PhysRevE.84.036118.
- (7) K. Yakubo and D. Korosak, Scale-free networks embedded in fractal space: Physical Review E (査読有) **83**, 66111:1-12 (2011), DOI=10.1103/PhysRevE.83.066111.
- (8) F. Kawasaki and K. Yakubo, Dynamical Crossover in Complex Networks near the Percolation Transition: Journal of the Physical Society of Japan (査読有) **80**, 104001:1-6 (2011), DOI=10.1143/JPSJ.80.104001.

- (9) M. Nemoto, T. Yoshimura, H. Nakazawa, and K. Yakubo, Quantification of Superiority of Broad-Buffer Diodes: Japanese Journal of Applied Physics (査読有) **50**, 054301:1-4 (2011), DOI=10.1143/JJAP.50.054301.
- (10) M. Kumagai, T. Takagahara, and K. Yakubo, Topological transition by dielectric control of exciton wavefunction in thin nanotube structure: Solid State Communications (査読有) **151**, 663-666 (2011), DOI=10.1016/j.ssc.2011.02.026.
- (11) M. J. Zheng, D. Y. Lei, K. Yakubo, and K. W. Yu, Asymmetric Propagation of Optical Signals in Graded Plasmonic Chains: Plasmonics (査読有) **6**, 19-27 (2011), DOI=10.1007/s11468-010-9164-5.
- (12) M. Sato, M. A. Wadee, K. Iiboshi, T. Sekizawa and H. Shima, Buckling patterns of complete spherical shells filled with an elastic medium under external pressure: Int. J. Mech. Sci. (査読有) **59**, 22-30 (2012), DOI=10.1016/j.ijmecsci.2012.02.001.
- (13) S. Ono and H. Shima, Flexible control of the Peierls transition in metallic C60 polymers: Europhysics Letters (査読有) **96**, 27011:1-5 (2011), DOI= 10.1209/0295-5075/96/27011.
- (14) H. Yoshioka and H. Shima, Density of states anomalies in multichannel quantum wires: Phys. Rev. B (査読有) **84**, 075443:1-8 (2011), DOI=10.1103/PhysRevB.84.075443.
- (15) M. Sato, M. A. Wadee, T. Sekizawa, K. Iiboshi and H. Shima, Hydrostatically pressurized buckling of complete spherical shells filled with an elastic medium: JSCE J. Appl. Mech. (査読有) **67**, 115-122 (2011).
- (16) S. Ono and H. Shima, Phonon dispersion and electron-phonon interaction in peanut-shaped fullerene polymers: J. Phys. Soc. Jpn. (査読有) **80**, 064704:1-5 (2011), DOI=10.1143/JPSJ.80.064704.
- (17) H. Shima and H. Yoshioka, Electronic spectral shift of oxygen-filled (6,6) carbon nanotubes: Chem. Phys. Lett. (査読有) **513**, 224-228 (2011), DOI=10.1016/j.cplett.2011.07.084.
- (18) I. Hasegawa and H. Shima, Continuous transition of defect configuration in a deformed liquid crystal film: Mod. Phys. Lett. B (査読有) **25**, 581-588 (2011), DOI=10.1142/S0217984911025912.

(19) S. Furuya and K. Yakubo, Scale-free property of local-world networks and their community structures: *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications* (査読有) **389**, 5878-5886 (2010), DOI=10.1016/j.physa.2010.09.009.

(20) F. Kawasaki and K. Yakubo, Reciprocal relation between the fractal and the small-world properties of complex networks: *Physical Review E* (査読有) **82**, 036113:1-7 (2010), DOI=10.1103/PhysRevE.82.036113.

(21) S. Furuya and K. Yakubo, Statistical properties of weighted complex networks characterized by metaweights: *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications* (査読有) **389**, 1265-1272 (2010), DOI=10.1016/j.physa.2009.12.001.

(22) H. Shima, M. Sato, K. Iiboshi, S. Ghosh and M. Arroyo, Diverse corrugation pattern in radially shrinking carbon nanotubes: *Physical Review B* (査読有) **82**, 085401:1-7 (2010), DOI=10.1103/PhysRevB.82.085401.

(23) H. Shima, Growth of Aqueous Foam on Flexible Membranes: *Journal of the Physical Society of Japan* (査読有) **79**, 074601:1-5 (2010), DOI=10.1143/JPSJ.79.074601.

(24) H. Taira and H. Shima, Anomalous phase shift in a twisted quantum loop: *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* (査読有) **43**, 354013:1-11 (2010), DOI=10.1088/1751-8113/43/35/354013.

[学会発表] (計 27 件)

(1) 矢久保考介「過負荷故障に対する複雑ネットワークの堅牢性」、SMARTプログラム 複雑ネットワーク・サマースクール (招待講演)、2012年9月10日～2012年9月12日、東北大学情報科学研究科。

(2) 矢久保考介「フラクタル複雑ネットワーク」、CMRU研究会「ネットワーク科学の数理と展開」(招待講演)、2012年9月13日～2012年9月14日、東北大学青葉記念会館。

(3) 水高将吾、矢久保考介「過負荷故障に対する複雑ネットワークの堅牢性」日本物理学会2012年秋季大会、2012年9月18日～2012年9月21日、横浜国立大学。

(4) 渡邊章友、矢久保考介「複雑ネットワークの構造とSOCの普遍クラス」日本物理学会2012年秋季大会、2012年9月18日～2012年9月21日、横浜国立大学。

(5) 水高将吾、矢久保考介「MI転移における局所状態密度の臨界的振舞いと普遍揺らぎ」、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日～27日、関西学院大学 (兵庫県西宮市)。

(6) 渡邊章友、矢久保考介「スケールフリー・ネットワーク上の触媒反応ダイナミクス」、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月24日～27日、関西学院大学 (兵庫県西宮市)。

(7) 島弘幸「幾何-物性相関の理論展開」、ナノ学会ワークショップ「現代幾何学と表面・ナノ物質科学との新融合領域」、2012年3月22日、東京工業大学 (大岡山)。

(8) 島弘幸「微小材料における形状物性相関の理論解析」、土木学会・応用力学フォーラム、2012年2月8日、北海道大学 (札幌市)。

(9) S. Furuya and K. Yakubo, "Multifractal property of scale-free networks", International Schools and Conference on Network Science, 2011年6月6日～10日, Hungarian Academy of Sciences (Hungary).

(10) 水高将吾、矢久保考介「金属-絶縁体転移における秩序変数の普遍分布」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月21日～24日、富山大学 (富山県富山市)。

(11) 矢久保考介、Dean Korosak「ランダムグラフの複雑性: OdCと臨界性」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月21日～24日、富山大学 (富山県富山市)。

(12) 川崎文也、矢久保考介「浸透転移点近傍におけるネットワーク上の動的クロスオーバー」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月21日～24日、富山大学 (富山県富山市)。

(13) 古谷修平、矢久保考介「フラクタル複雑ネットワーク構造のマルチフラクタル性」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月21日～24日、富山大学 (富山県富山市)。

(14) 矢久保考介、D. Korosak、川崎文也「地理的ネットワークのコンパクト性」、第9回HSSワークショップ、2011年2月24日、北海道大学 (札幌市)。

(15) 川崎文也、矢久保考介「複雑ネットワークのスモールワールド性とフラクタル性」、第9回HSSワークショップ、2011年2月24日、北海道大学 (札幌市)。

(16) 小野頌太、島弘幸「擬一次元C60ポリマーの光励起キャリア緩和におけるフォノンボトルネック効果の消失」、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月21日～24日、富山大学 (富山県富山市)。

(17) 島弘幸「Dry Foamの粗大化現象: 幾何と物理の邂逅」、愛媛大学理学部・第61回数学談話会、2011年4月18日、愛媛大学 (松山市)。

(18) 小野頌太、島弘幸「キャリアドーブによるピーナツ型C60重合体の金属-絶縁体転移温度制御」、ナノ学会第9回大会、2011年6月2日～4日、北海道大学 (札幌市)。

(19) S. Ono and H. Shima, "Peierls transition temperature of peanut-shaped nanotubes", EP2DS19/MSS15, 2011年7月25日～29日, Florida State University (USA).

(20) M. Sato and H. Shima, "Thin-shell theory for carbon nanotube deformation under pressure", The 6th International Conference on Thin Walled Structures, 2011年9月5日～7日, Politehnica University of Timisoara (Romania).

(21) K. Yakubo and D. Korosak, "Geographical Networks Embedded in a Fractal Space", New Frontiers in Complex Networks [Statphys24 satellite meeting], 2010年7月12日-16日, Seoul National University (Korea).

(22) S. Furuya and K. Yakubo, "Scale-free Property and Community Structure of Networks Formed by Local Information", New Frontiers in Complex Networks [Statphys24 satellite meeting], 2010年7月12日-16日, Seoul National University (Korea).

(23) F. Kawasaki and K. Yakubo, "Exclusive Relation between Fractality and the Small-world Property in Complex Networks", New Frontiers in Complex Networks [Statphys24 satellite meeting], 2010年7月12日-16日, Seoul National University (Korea).

(24) 矢久保考介, Dean Korosak 「フラクタル空間に埋め込まれた地理的ネットワークの効率とコンパクト性」、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府)。

(25) 古谷修平、矢久保考介 「媒介中心性の空間分布とそのマルチフラクタル性」、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府)。

(26) 川崎文也、矢久保考介 「フラクタル複雑ネットワークの拡散とスペクトル次元」、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月23日-26日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府)。

(27) 小野 頌太、島弘幸 「曲面型ナノ構造のフォノン分散における幾何形状効果」、第8回HSSワークショップ、2010年3月11日、シオノギ創薬イノベーションセンター (札幌市)。

[図書] (計 2 件)

(1) 矢久保考介 「複雑ネットワークとその構造」(共立出版社、2013)、総ページ数 360ページ。

(2) H. Shima and M. Sato, "Elastic and Plastic Deformation of Carbon Nanotubes" (Pan Stanford Publishing, 2012)、pp. 1-150.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢久保 考介 (YAKUBO KOUSUKE)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号 : 40200480

(2) 研究分担者

島 弘幸 (SHIMA HIROYUKI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
(現 : 山梨大学・大学院医学工学総合研究・准教授)
研究者番号 : 40312392