

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20740227

研究課題名（和文） 非線形非平衡系にみられる間欠性ゆらぎの統計力学とその応用

研究課題名（英文） Statistical mechanism of intermittent fluctuations observed in nonlinear nonequilibrium system and its applications

研究代表者

清野 健 (KIYONO KEN)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40434071

研究成果の概要（和文）：

間欠性ゆらぎの解析法を開発し、非線形非平衡系にみられる現象を解析した。発達乱流などの非線形非平衡系で観測される間欠性ゆらぎの非ガウス確率密度関数は、分散の異なるガウス分布の重ね合わせで記述できる場合がある。我々はこの点に注目し、非ガウス過程を確率変数の積として分解する方法を開発した。ここでは、観測された確率過程が局所的なガウス過程と、分散の非一様性を表わす対数振幅のゆらぎで相乗的に記述されることを仮定した。この仮定の枠組みに基づけば、観測時系列の対数絶対値モーメントの推定を通じ、対数振幅の統計的性質を明らかにできることを示した。この方法では、べき的な裾をもつ分布で分散が有限でない非ガウス分布についても、対数振幅の統計量は有限になるため、非常に幅広い確率過程に適用可能になる。理論的・数値的例として、ランダムカスケードモデルや *superstatistics* の性質を議論した。粗視化スケールの増加にともなうガウス分布への遅い漸近に注目し、その速さを数値的、理論的に見積もった。また、応用例として、心拍変動の解析を行った。

さらに、複雑系で観測される、非対称間欠性を特徴づけるために、中央値を中心とした正側、負側の非ガウス統計量を提案した。そのような非対称過程の数値例として、カスケード過程を拡張した確率過程を構築し、このモデルの理論的性質が、我々の提案した推定法で求められることを数値実験で確認した。この方法を心拍変動解析に応用し、心拍変動に見られる非対称性が加齢や自律神経系異常に依存して変化することを見出した。

研究成果の概要（英文）：

In studies of hydrodynamic turbulence and nonequilibrium systems, it has been demonstrated that the observed non-Gaussian probability density functions are often described effectively by a superposition of Gaussian distributions with fluctuating variances. Based on this framework, we propose a general method to characterize intermittent and non-Gaussian time series. In our approach, an observed time series is assumed to be described by the multiplication of Gaussian and amplitude random variables, where the amplitude variable describes the variance fluctuation. It is shown analytically that statistical properties of the log-amplitude fluctuations can be estimated using the logarithmic absolute moments of the observed time series. This method is applicable to a wide variety of symmetric unimodal distributions with heavy tails. By analyzing random cascade-type processes and superstatistical non-Gaussian models, we demonstrate that our method can provide detailed characterization in a wide range of non-Gaussian fluctuations. Using this method, we study healthy heart rate variability, which show the slow convergence to a Gaussian distribution through coarse graining procedure.

Moreover, to study asymmetric intermittent fluctuations observed in complex systems, we propose positive- or negative-directional non-Gaussian statistics. As a numerical example of asymmetric intermittent fluctuations, we heuristically introduce a random cascade-type model. Using our method, it is demonstrated that the asymmetric properties of heart rate variability depend on aging and autonomic disorder.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：非平衡・非線形物理学

1. 研究開始当初の背景

(1) ゆらぎの情報論

A. Einstein が 1905 年に発表した論文「ブラウン運動の理論」では、水中に浮かんだブラウン粒子の運動の観測を通じて、当時未確認であった原子、分子の存在を確かめる方法が議論されている。この系においては、ブラウン粒子を動かす「もの」は、そのまわりの流体分子である。この系について時間刻みがある程度粗く見れば、多数の水分子衝突の集積として、ブラウン粒子の確率的記述が可能になる。Einstein の理論では、ブラウン粒子の確率的な「時間発展の記述」から、間接的にまわりの水分子に関する情報(アボガドロ数)を引き出している。

同様のアプローチが、より複雑なシステムの情報を抽出する際にも有効であることを示すことが、本研究の大きなねらいである。例えば、我々の心拍数の変動を長時間測定してみれば、そこには不規則な変動が見てとれる。心臓の拍動ペースは、主に自律神経系を通じて制御されているが、薬理遮断等の方法でその制御を断ち切れば、心拍動のリズムはより規則的になる。このことから、通常観測される心拍数の不規則性は、自律神経系を含むシステム全体の情報を反映していると考えられている。現時点では自律神経系などの振舞いを詳細に記述する理論はない。しかし、心拍リズムの不規則性の記述を通じて、自律神経系などの生体制御に関する情報を抽出できる可能性が示唆されており、臨床応用に役立つ方法論の確立が期待されている。他の社会や経済といったシステムにおいては、不規則性を生み出す「もの」は、ブラウン運動や心拍の例と異なっているが、その「時間発展の記述」については共通性があり、確率的な揺動と相互作用を含む非線形非平衡系に共通する理論の枠組みが構築できる可能性がある。

私自身のこれまでの研究においても、非平衡系の不規則変動に見られる間欠性ゆらぎの統計的性質がシステムの情報源となる可能性が示唆されている。今後はさらに大規模なデータベースに基づいたシステム情報論

を構築することで、リスク解析への新たな方法論と応用例を提示する。

(2) 間欠性ゆらぎ

非線形非平衡系の不規則性を特徴づける際、間欠性と呼ばれる分散の不均一性をどのように定量化するのが問題となることがある。例えば、発達乱流における間欠性の問題、経済時系列におけるヴォラティリティ(局所分散)のクラスタ化の問題があり、これらの問題は各分野における重要な問題として認識されている。また、私の過去の研究において、心疾患患者の心拍変動における間欠性、磁場対流系の磁場エネルギーの間欠性を調べた結果、多くの間欠性ゆらぎには現象論的な共通性があることが見出された。

2. 研究の目的

本研究では、複雑流体系、生体・脳神経システム、経済市場などの非線形非平衡系にみられる間欠性ゆらぎについて、(1)数理モデルの構築と解析、(2)非ガウス型確率過程の統計理論と時系列解析手法の開発、(3)リスク解析への応用を目指したゆらぎの情報論の構築を目指す。(1)の部分では、マルチフラクタルモデルに基づく従来の枠組みでは記述できなかった、不完全な自己相似性をもつ間欠性ゆらぎに焦点をあてる。ここでいう不完全な自己相似性とは、乱流のカスケード過程における自己相似性仮説の破れに対応し、いくつかの実験研究により、そのような現象の存在が報告されている。本研究では、非自己相似カスケード過程の一般化、現象論的モデルについて検討し、分散の非一様性を生む間欠性ゆらぎのメカニズムを明らかにする。(2)の部分では、非ガウス型確率過程の時系列解析の新しい枠組みを提案する。時系列解析に必要な統計理論を整備し、幅広い現象に適用可能な方法論を提案する。(3)の部分では、心拍変動解析に基づく臨床診断、株式市場の大変動リスクの評価といった応用の可能性を検討する。

3. 研究の方法

自然界で観測される間欠性ゆらぎを特徴

付けるための解析法を開発し、複雑流体系、生体・脳神経システム、経済市場などの非線形非平衡系にみられる間欠性ゆらぎの特徴を分析する。間欠性ゆらぎの解析に基づき、システム内の情報を抽出するための情報論的視点と、間欠性ゆらぎの背後にある数理的メカニズムを明らかにするためのシステム論的視点の両面から、非線形非平衡系における間欠性ゆらぎの問題に取り組む。

4. 研究成果

(1) 対数振幅モーメントの推定法

乗法的確率過程の対数絶対値モーメントと対数振幅モーメントの関係式を導き、観測時系列から対数振幅モーメントが推定できることを示した。この対数振幅モーメントはガウス過程からのずれを定量化する指標として応用できる。また、べき的な裾を含む広いクラスの前ガウス型確率過程は有限の対数振幅モーメントをもつことが示せる。したがって、今回開発した解析法は一般の前ガウス型確率過程の特徴付けに有効であり、幅広い分野における応用の可能性をもっている。本年度は応用例として、発達乱流の現象論的モデルであるカスケード過程について、前ガウスゆらぎのスケール依存性を理論的に導いた。

(2) 心筋梗塞後の心拍変動の統計的性質

心筋梗塞後の心拍変動の統計的性質を調べた。粗視化時系列の前ガウス性に注目した解析を行い、前ガウス指標が心筋梗塞患者の心臓死の危険因子であることが示唆された。

(3) Beck-Cohen superstatistics の対数振幅と極値統計の関係

非平衡系で観測される前ガウス分布を記述するために Beck と Cohen が導入した、superstatistics と、本研究で導入した相乗的確率過程との関係を明らかにした。我々の相乗的確率過程では、観測時系列がローカルな変動を表わす正規確率変数と標準偏差の変動を表わす対数振幅変数に分解されるが、対数振幅変数が極値分布に従うとき、観測される分布は自由度の2のt分布(指数-3のべき分布)、もしくは両側指数分布になることを示した。これらの分布は、superstatistics の典型的なクラスに属しているが、任意のパラメタを含んでおり、なぜそのような分布が自然に観測されるかを説明することはできていなかった。本研究では、それらの分布と極値統計における極限分布との関係を示し、調整パラメタに依存せずに特徴的な分布が出現することに可能な説明を与えた。

(4) 非対称間欠性時系列の解析法の開発

これまで我々が取り組んできた間欠性時

系列の解析では、平均値まわりでの対称な変動を対象としてきた。しかし、生体信号や経済時系列では、正負方向の変動を生むメカニズムが異なることも考えられるため、これまでの方法では、そのような非対称性を示す時系列の詳細な特徴付けは不可能であった。そこで我々は、中央値を代表値として正負方向の非対称性が見られる間欠性ゆらぎの解析法を開発した。我々の方法では、非対称前ガウス分布のみで特徴付けられる確率過程だけでなく、正負方向の変動幅の相関の違いにも注目し、その解析法を新たに導入した。

また、このような非対称間欠性を生む離散確率過程についても考案した。この確率過程は、乱流の現象論的モデルとして提案されている確率カスケード過程を一般化したもので、中央値まわりの正負方向で別々のカスケード過程を仮定している。この過程で理論的に予言される値が、我々の導入した解析法で正しく推定されることを確かめた。

(5) 心拍変動の多重スケール解析

人の心拍数は主に自律神経系からの制御を受け絶えず変動している。これまで、自律神経系機能の異常と心臓突然死との関連性が知られており、心拍変動解析を通じた自律神経機能の評価が心疾患の予後予測に有効であることが示されてきた。我々は、心拍変動の解析に、非線形非平衡現象を特徴付けるための指標を応用した。生体システムには多様な生理学的機序が働くため、心拍変動には時間スケールの異なる複数のダイナミクスが反映されていると予想される。そこで、単に指標を推定するだけでなく、心拍変動時系列の粗視化を導入し、心拍変動に見られる特徴的時間スケールが同定できる多重スケール解析法を考案した。

この方法を慢性心房細動などの時系列に応用し、心臓突然死や脳梗塞の予測因子である可能性がある時間スケールと指標を見出した。今後、より大規模なデータベースに我々の開発した方法を適用することで、死亡リスクの予測に役立つ新たな情報を抽出できる可能性を示唆した。

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 7 件)

- ① Ken Kiyono, Naoaki Bekki, Intermittent characteristics of healthy heart rate variability, Pacific Science Review, 出版予定.
- ② 清野 健, 間欠性ゆらぎの前ガウス統計とその心拍変動解析への応用, 精密工学会誌, 77 (2011) 153-157.
- ③ Ken Kiyono, Log-amplitude statistics

of non-Gaussian fluctuations, Journal of Physics: Conference Series, 221, 012010 (2010). 査読有.

- ④ Ken Kiyono and N. Bekki, Non-Gaussian characteristics of intermittent fluctuations, Pacific Science Review, 12, pp. 65-67 (2010).
- ⑤ Ken Kiyono, Non-Gaussian statistics and its application to heart rate variability analysis, The Institute of Statistical Mathematics Cooperative Research Report, 242, 95-103 (2010).
- ⑥ Ken Kiyono, Log-amplitude statistics of intermittent and non-Gaussian time series, Physical Review E, 79, 031129 (2009). 査読有.
- ⑦ Naoaki Bekki, Ken Kiyono, Hidetoshi Konno, Non-Gaussian Statistics of intermittent chaos in Boussinesq magnetoconvection, Pacific Science Review, 10, 199-203 (2008). 査読有.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 清野 健, 戸次直明, 間欠性ゆらぎの対数振幅にみられる長時間相関, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 28 日.
- ② 清野 健, 戸次 直明, 心拍変動の間欠性と非対称性, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大, 2010 年 9 月 25 日.
- ③ 清野 健, 心拍変動にみられる非対称間欠性, 統計数理研究所共同利用重点型研究「医用診断のための応用統計数理の新展開 II」, 統計数理研究所, 2010 年 9 月 17 日.
- ④ 清野 健, Beck-Cohen superstatistics と極値統計の関係, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 20 日.
- ⑤ 清野 健, 非ガウス統計の心拍変動解析への応用, 統計数理研究所共同利用重点型研究「医用診断のための応用統計数理の新展開」, 統計数理研究所, 2009 年 12 月 4 日.
- ⑥ 戸次直明, 清野健, 金野秀敏, 磁場対流系カオスの間欠性再帰時間の冪分布, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大, 2009 年 9 月 28 日.
- ⑦ 緒形ひとみ, 清野健, 大倉正嗣, 宮下愛未, 片寄泰子, 徳山薫平, 佐藤誠, 山本義春, 睡眠中に変動する代謝パラメータに関する検討, 第 24 回生体・生理工学シンポジウム, 東北大, 2009 年 9 月 26 日.
- ⑧ 清野 健, 非ガウ斯的な心拍変動の数理的メカニズム, 第 24 回生体・生理工学シンポジウム, 東北大, 2009 年 9 月 26 日.
- ⑨ 清野 健, 戸次 直明, 非ガウス分布の対数振幅モーメント推定量, 日本物理学会

第 64 回年次大会, 立教大, 2009 年 3 月 30 日.

- ⑩ 戸次 直明, 清野 健, 金野 秀敏, 磁場対流系間欠性カオスのマルチスケール解析, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日.
- ⑪ K. Kiyono, Non-Gaussian statistics of intermittent fluctuations and its application to heart rate variability analysis, The International Symposium for Dynamic Electrocardiography, 2010 年 3 月 27 日.
- ⑫ K. Kiyono, Y. Yamamoto, Z.R. Struzik, Scale dependence of increment probability density function in S&P500 Index, Applications of Physics in Financial Analysis 7, 2009 年 3 月 4 日.
- ⑬ K. Kiyono, Log-amplitude statistics of non-Gaussian fluctuations, Applications of Physics in Financial Analysis 7, 2009 年 3 月 2 日.
- ⑭ 清野 健, 非ガウス型乱数と対数振幅モーメント推定量, 統計数理研究所共同利用重点型研究「統計科学における乱数」研究会, 2008 年 12 月 13 日.
- ⑮ 清野 健, 戸次 直明, 間欠性ゆらぎにおける対数振幅の特徴付け, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 岩手大学(岩手).
- ⑯ K. Kiyono, Non-Gaussian statistics of intermittent fluctuations, The 5th International Conference on Nonlinear Science (Dynamics Days Asia Pacific 5), Nara, Japan, 2008 年 9 月 12 日.
- ⑰ Z. R. Struzik, K. Kiyono, Y. Yamamoto, Is complexity of heart rate decreased or increased in congestive heart failure, The 5th International Conference on Nonlinear Science (Dynamics Days Asia Pacific 5), Nara, Japan, 2008 年 9 月 11 日.
- ⑱ N. Bekki, K. Kiyono, H. Konno, Non-Gaussian Statistics of Intermittent Chaos in Boussinesq Magnetoconvection, 8th Asia-Pacific Conference Fundamental Problems of Opto and Microelectronics (APCOM2008), Tokyo, Japan, 2008 年 9 月 3 日.

[図書] (計 2 件)

- ① 吉岡 公一郎, 清野 健, deceleration capacity of heart rate, 心臓突然死を予知するための不整脈ノンインベシブ検査, 田邊晃久編, 医学書院, pp. 157-164, (2010).
- ② Ken Kiyono, Yoshiharu Yamamoto and Zbigniew R. Struzik, Complex Dynamics

in Physiological Systems: From Heart
to Brain, Springer Netherland, pp.
139-154 (2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清野 健 (KIYONO KEN)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：4 0 4 3 4 0 7 1