

氏 名	な か やま やす や 名 嘉 山 祥 也
学 位 の 種 類	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 84 号
学位授与の日付	平 成 15 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情 報 学 研 究 科 複 雑 系 科 学 専 攻
学位論文題目	Statistical physics approach to strongly correlated fluctuations and its application to fluid turbulence and heart rate variability (強相関ゆらぎに対する統計物理的アプローチと流体乱流および心拍変動へのその応用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 藤 坂 博 一 教 授 木 上 淳 教 授 船 越 満 明

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、さまざまな現象において観測される、自己相似性を示す強い相関をもつゆらぎに関して、大偏差統計および多重フラクタル理論を基礎にした解析方法を提案している。さらに、提案した方法を流体乱流および心拍変動の観測データに応用し、それぞれの現象におけるゆらぎの自己相似構造を明らかにしている。

第1章では、発達した一様等方性流体乱流や心拍変動で観測される強い相関をもつゆらぎが示す自己相似性と強い非ガウス性の統計的な特徴が多重フラクタル理論の観点から述べられている。

第2章では、エネルギーカスケード過程に起因する流体乱流の速度場が示す自己相似構造を明らかにしている。まず、発達した乱流における速度場とエネルギー散逸率場の統計理論の歴史的な経過に関する記述のあと、本研究で提案する、大偏差統計理論を基礎にしたスケーリング理論について述べ、これまでの乱流場のスケーリング理論の枠組みは、本論文で提案している枠組みで統一できることを示している。最近実験的に見出された、中間レイノルズ数やエネルギー注入スケールあるいは散逸スケールの境界を含む領域で成立する拡張された自己相似性を導く新しいスケーリング仮説を提案し、風洞乱流実験によるデータとナビエ・ストークス方程式の数値実験によるデータを用いて、本論文で提案するスケーリング仮説の妥当性を検証している。拡張された自己相似性は2つのスケーリング関数によって特徴づけられる。データの解析により、これらのスケーリング関数が存在することを確かめ、現象論的な考察によりその関数形を提案している。

第3章では、心拍変動において観測される長い時間領域にわたる強い相関を示すゆらぎの統計的特徴に関して自己相似性に基づいた解析を行っている。解析は、モーメント特性関数と多重フラクタル性を特徴づけるスケーリング指数 z のゆらぎに対する特性関数 $S(z)$ スペクトルの2通りを用いて行われている。データから直接求めた $S(z)$ スペクトルを用いた解析は本研究が初めてである。 $S(z)$ スペクトルを精度良く得るには、相関時間に対応する長い時間スケール T の見積もりが不可欠であるが、本論文では、 T の見積もりを行う方法を提案している。さらに、健常者と軽度の糖尿病患者および神経障害を併発している糖尿病患者を対象にした心拍変動のデータを解析し、疾患の有無に関わらず心拍変動は多重フラクタル性を示すことを確認した。被験者の疾患の程度が多重フラクタル性を特徴づける特性量にどのように反映されるかについて調べ、被験者の疾患の程度は多重フラクタル理論の観点から定量化できることを示した。これをもとに、多重フラクタル性の観点から疾患の程度を定量化する新しい指標を提案している。

第4章では、乱流統計において導入された速度場とエネルギー散逸場の2種類の多重フラクタル性を特徴づける指数間の関係を一般的な強相関ゆらぎの文脈で考察している。自己相似性が成立する境界を見積もるカットオフスケールがスケーリング指数に依らない場合を考察することにより多重フラクタル性を特徴づける2種類の指数間の一般的な関係式を導いている。この関係は、3次元乱流で成立すると考えられる関係とは異なった表式をもつ。さらに、数値シミュレーションを行ない、ランダム力によって駆動されたBurgers乱流の多重フラクタルに対する2つの指数間の関係は、本論文で見出した表式により記述されることを見出している。

第5章は、本論文のまとめと結論にあてられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、流体乱流の速度場ゆらぎや心拍変動を典型とする自己相似性を示す強相関ゆらぎを、確率論の大偏差統計および多重フラクタル理論を基礎にして解析する方法を提案し、提案方法を流体乱流および心拍変動の観測データに応用し、それぞれのゆらぎの自己相似構造を明らかにしたものである。本論文の主な結果は以下の通りである。

＜流体乱流に関して＞：

(1) これまで提案されている乱流場に対するさまざまなスケーリング理論を、大偏差統計を基礎にして統一的な定式化を行った。これにより、これまでの乱流場のスケーリング理論の枠組みは本論文で提案している枠組みで統一できることが明らかになった。

(2) 観測で見出されている、中間レイノルズ数やエネルギー注入スケールあるいは散逸スケールの境界まで含む拡張された自己相似性を導く新しいスケーリング仮説を提案し、観測データを用いてその妥当性を検証した。さらに、現象論的な考察により、拡張された自己相似性を特徴付ける2つのスケーリング関数の関数形を決定した。

＜心拍変動に関して＞：

(3) 心拍変動において観測される数分から十数時間にわたる長い時間領域にわたる強い相関を示すゆらぎの統計的特徴に関して自己相似性に基づいた解析を行った。解析は、モーメント特性関数による方法と多重フラクタル性を特徴づけるスケーリング指数 z のゆらぎに対する特性関数 $S(z)$ スペクトルを用いた方法の2通りを用いて行われている。これまで、モーメント特性関数による研究は行われているが、データから $S(z)$ スペクトルを直接求める方法は本論文で初めて提案された。 $S(z)$ スペクトルを精度良く求めるために、相関時間 T を精度良く見積もる方法を提案した。

(4) 健常者と軽度の糖尿病患者および神経障害を併発している糖尿病患者を対象にした心拍変動のデータを解析し、被験者の疾患の程度を多重フラクタル理論の観点から定量化できることを示した。これをもとに、多重フラクタル性の観点から疾患の程度を定量化する新しい指標を提案した。

＜2種類の特性指数間の関係に関して＞：

(5) 自己相似性が成立する境界を見積もるカットオフスケールがスケーリング指数に依らない場合に、多重フラクタル性を特徴づける2種類の指数間に成立する一般的な関係式を見出した。ランダム力下のBurgers乱流の数値実験により、本論文で見出した関係式が成立することを確認した。

以上のように、本論文は、多重フラクタル性を示す強相関ゆらぎの統計理論的研究において意義のある知見を得たものである。最近、多くの分野で、フラクタルゆらぎを示す強相関ゆらぎが観測されている。本論文で提案した方法は、このような自己相似性を示す種々の系への応用が可能であり、強相関ゆらぎの統計理論の発展に貢献をなすものである。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年4月21日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。