

間欠性ゆらぎと超普遍性

Intermittency and superuniversality

藤坂 博一[1]

Hirokazu Fujisaka[1]

[1] 京都大・情報・複雑系科学

[1] AACDS, Graduate School of Informatics, Kyoto Univ.

発達した乱流においては、数桁の空間スケールにわたり大きなゆらぎが観測され、エネルギーカスケード過程と理解される力学過程に起因してエネルギー注入スケールと散逸スケールの間(慣性領域)で自己相似な統計特性が成立する。このような自己相似性をどのように物理的、数学的に定式化するかは過去半世紀近くにわたって大きな問題であった。強相関係の統計熱力学形式や多重フラクタル理論により新しい観点からの解析が可能となった。

乱流にみられる自己相似性はカスケード過程の間欠性と密接に結びついているために乱流固有な特性と考えられそうであるが、そうではなく、極めて広い範囲で成立するらしい。ただ、自己相似性発現の機構がカスケード過程の間欠性にあるということであり、自己相似性を示す系は他にも多くあり、機構が異なるというに過ぎない。本講演では、自己相似性統計を示す3つの系を例にとり、自己相似ゆらぎに普遍的な統計特性およびその解析法について説明する。

(1) 発達した乱流

Kolmogorov スペクトルを導く速度構造関数のスケージングは、大きなべきの領域で観測結果と一致しない。これはエネルギー散逸率のゆらぎを取り込んでいないことに起因するものである。空間的に粗視化したエネルギー散逸率のゆらぎが粗視化スケールを小さくしていくときにどのようにゆらぎが増大するかを見積もることにより、速度構造関数の漸近ふるまいを導くことができる。これまで対数正規理論、ベータモデル、対数ポアソン理論などが提案されているが、本理論によりこれらを統一することができる。

(2) オンオフ間欠性の強相関統計

典型的にはカオス素子の結合系にみられるようにカオス特解が制御変数の変化に対して不安定化するときオンオフ間欠性とよばれる特有な時間変動が観測される。結合系ではラミナー状態は同期カオスになっており、バーストは同期が破れた状態である。この間欠性は同期状態が不安定化した直後に観測され、局所横断拡大率のゆらぎ強度で決まる短い時間スケールと不安定点近傍であることによる長い時間スケールの間で自己相似な間欠性ゆらぎが観測される。上で述べた乱流統計理論にならって強相関領域でのゆらぎの統計理論を構築することができる。

(3) 臨界点におけるイジングスピン系

平衡系の臨界点近傍では秩序変数ゆらぎが空間的に長い相関をもつことに起因して熱力学的異常性が観測され、この異常性は臨界指数で定量化される。磁性体や液体のように全く異なる系でも臨界ふるまいを決める3つの条件が満たされていると、臨界指数は一致することが知られており、臨界現象の普遍性とよばれている。通常の臨界指数は秩序変数の2体相関関数と関係したものである。臨界点近傍での大きなゆらぎを調べるために、ある粗視化スケールで平均した秩序変数を導入する。粗視化スケールを変えていくとき、ゆらぎが小さくなっていく程度を見積もる指数のゆらぎを考えることにより、秩序変数のグローバルな特性を解析することが可能である。

このように、系は全く異なるが、広い空間スケールあるいは時間スケールで観測される間欠性現象に起因して、その漸近的統計特性を特徴づける普遍的な統計則がするようである。講演では、このようなゆらぎを特徴づけるための基本的な概念と数学的な方法について数値実験の結果を示しながら説明する。また、乱流やオンオフ間欠性の統計則がそれぞれその発生機構に依らないという意味での普遍性や臨界現象の普遍性より一段上の普遍性(超普遍性)の概念を提唱する。

文献 [1] 乱流の統計理論: U. Frisch, *Turbulence*, (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995). ; T. Watanabe et al., *Phys. Rev. E*, 61, R1024 (2000). [2] オンオフ間欠性の強相関領域の解析: H. Fujisaka et al., *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, No. 139, 70 (2000). [3] 臨界現象の普遍性: N. Goldenfeld, *Lectures on Phase Transitions and the Renormalization Group*, (Addison-Wesley, Massachusetts, 1992). [4] 統計熱力学形式: H. Fujisaka et al., *Prog. Theor. Phys.* 77, 1334 (1987); 藤坂博一, 非平衡系の統計力学, 第4章, (産業図書, 1998); 日本物理学会誌, 第54巻6月号, 423 (1999); 数理科学, No.436, 29 (1999).