

機関番号：14101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20540374
 研究課題名（和文） 超統計に対する熱力学形式の定式化と複雑系におけるスケーリング則の系統的導出
 研究課題名（英文） Formulation of the thermodynamic formalism for superstatistics and systematic derivations of scaling laws in complex systems
 研究代表者
 阿部 純義（SUMIYOSHI ABE）
 三重大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70184215

研究成果の概要（和文）：得られた成果のうち最も重要なものは、対数正規型超統計の基礎づけに成功したことである。この理論は超統計のもつ3つのユニヴァーサルティ・クラスの中のひとつで、乱流の研究などに応用されるが、これまでは乗法的確率過程に対する中心極限定理を用いる議論のみが知られていた。本研究では、非平衡系におけるエントロピーの揺らぎに注目し、揺らぎ定理を適用することにより、対数正規型超統計の定式化に成功した。なお、研究期間中に、複雑系や量子熱力学などに関する研究も遂行することが出来た。

研究成果の概要（英文）：Among the obtained results, the most important is concerned with the success in formulating log-normal superstatistics (LNS). LNS belongs to three universality classes in superstatistics and can be applied to important phenomena such as turbulence. In the earlier works, LNS has been discussed only in the context of the central limit theorem for multiplicative processes. In my work, I focus my attention on entropy fluctuations in nonequilibrium systems and formulate LNS based on the fluctuation theorem. In addition to this, I could also complete other works on complex systems and quantum thermodynamics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：複雑系の統計力学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：超統計、複雑系

1. 研究開始当初の背景

超統計は複雑系の非平衡定常状態を記述するための統計力学的理論である。そこでは、局所平衡性の存在を仮定し、温度などの示強変数が時空的に揺らぐ状況が想定されている。局所平衡状態への緩和は速く、一方示強変数の揺らぎは遅い。すなわち、2つの大きく隔たる時間スケールが内在し、階層構造をなしている系を対象とする。ここにおいて最も重要な問題は、「揺らぎの性質を決める物理的原理は何か」ということである。本

研究以前には、この問題に関する議論はほとんどなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、上述の揺らぎの統計性を決定する原理の追求から出発し、超統計の研究の深化を目指した。しかし、これは当初の予想よりも遥かに困難な問題であったため、その結果、期間中、スケーリング則の系統的導出についてのまとまった結果を得る以前の段階に留まった。

3. 研究の方法

示強変数として、局所平衡状態の温度をとる。この温度の揺らぎを決定する原理を得ることが目的である。研究の結果、最終的に2つの可能性が残った。ひとつは最大エントロピー法によるものであり、もうひとつは揺らぎ定理を適用するものである。しかし、前者には、拘束条件として何を採用するかという点に関する任意性のため、原理としての弱さがある。そこで、エントロピーに対する揺らぎ定理に着目した。局所平衡状態のエントロピーは、局所温度の対数であることが分かる。このエントロピーの揺らぎ分布を、非平衡系において確立されている揺らぎ定理から導くことは斬新な視点を与えた。

4. 研究成果

(1) 上述の「研究の方法」で述べたエントロピーに対する揺らぎ定理の適用によって、最も単純な Gauss 型揺らぎ分布の場合に、対数正規型超統計が導かれることを見出した。また、この結果を乱流現象に応用し、エントロピー揺らぎに関する可能な実験についても考察した。

(2) その他の結果：研究期間の初期において、それまでに行っていた研究をまとめることが出来た。それらの内容は、熱交換に関する揺らぎ定理の巨視的な観点からの別証明、拡張された統計力学におけるエスコート分布による期待値の一樣連続性の問題、非加法的統計力学における H 定理の検討などの非平衡統計力学の基礎に関連する研究である。これらは、非平衡定常状態にある複雑系を記述すると期待されている拡張された統計力学に対する基礎研究について厳密な指針を与えるものであった。また、以前からの継続的テーマである地震活動の理解に対する複雑系科学によるアプローチに関しても、余震現象の非 Markov 性、地震ネットワークのスペクトルのスケーリング関係、地震ネットワークの特性量の値の普遍性、有限サイズスケーリングの発見などの成果があった。特に、独自の地震ネットワークの研究は注目を集めており、Springer-Verlag (New York) の百科事典 “Encyclopedia of Complexity and Systems Science” (全 11 巻) の地震に関する 1 巻に依頼記事を執筆した。更に、量子情報/量子エンタングルメント、量子演算、量子熱力学についても新しい成果を得ることが出来た。

(3) 成果の発表：下記のように、これらの成果はすべて査読付き学術専門誌上に論文として出版された。また、これらの研究には高い評価を得ているものが複数含まれており、実際、研究機関の 3 年間で 8 つの国際会議に呼ばれ招待講演を行った。

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 18 件)

- ① S. Abe, “Maximum-power quantum-mechanical Carnot engine”, *Phys. Rev. E* **83**, 041117 (2011). 査読有
- ② S. Abe and S. Okuyama, “Similarity between quantum mechanics and thermodynamics: Entropy, temperature, and Carnot cycle”, *Phys. Rev. E* **83**, 021121 (2011). 査読有
- ③ S. Abe, D. Pastén, and N. Suzuki, “Finite data-size scaling of clustering in earthquake networks”, *Physica A* **390**, pp.1343-1349 (2011). 査読有
- ④ S. Abe, “Fluctuations of entropy and log-normal superstatistics”, *Phys. Rev. E* **82**, 011131 (2010). 査読有
- ⑤ S. Abe, “Reply to the Comment by B. Andresen”, *Europhys. Lett.*, **92**, 40006 (2010). 査読有
- ⑥ S. Abe, “Essential discreteness in generalized thermostatics with non-logarithmic entropy”, *Europhys. Lett.* **90**, 50004 (2010). 査読有
- ⑦ S. Abe, Y. Itto, and M. Matsunaga, “Statistical quantum operation”, *Mod. Phys. Lett. B* **24**, pp.2015-2020 (2010). 査読有
- ⑧ S. Abe, A. R. Usha Devi, and A. K. Rajagopal, “The thermostatical aspect of Werner-type states and quantum entanglement”, *J. Phys. A: Math. Theor.* **43**, 045303 (2010). 査読有
- ⑨ S. Abe, Y. Itto, and M. Matsunaga, “On Noether’s theorem for the invariant of the time-dependent harmonic oscillator”, *Eur. J. Phys.* **30**, pp.1337-1343 (2009). 査読有
- ⑩ S. Abe and N. Suzuki, “Determination of the scale of coarse graining in earthquake network”, *Europhys. Lett.* **87**, 48008 (2009). 査読有

- ⑪ S. Abe, “Conditional approach to thermo-
superstatistics”, *Cent. Eur. J. Phys.* **7**,
pp.401-404 (2009). 査読有
- ⑫ S. Abe and N. Suzuki, “Main shocks and
evolution of complex earthquake networks”,
Braz. J. Phys. **39**, pp.428-430 (2009). 査読有
- ⑬ S. Abe, “Anomalous behavior of q -averages
in nonextensive statistical mechanics”, *J. Stat.
Mech.: Theory and Experiment*, P07027 (2009).
査読有
- ⑭ S. Abe, “Generalized molecular chaos
hypothesis and the H theorem: Problem of
constraints and amendment of nonextensive
statistical mechanics”, *Phys. Rev. E* **79**, 041116
(2009). 査読有
- ⑮ S. Abe and N. Suzuki, “Scaling relation for
earthquake networks”, *Physica A* **388**,
pp.2511-2514 (2009). 査読有
- ⑯ S. Abe and N. Suzuki, “Violation of the
scaling relation and non-Markovian nature of
earthquake aftershocks”, *Physica A* **388**,
pp.1917-1920 (2009). 査読有
- ⑰ S. Abe, “Instability of q -averages in
nonextensive statistical mechanics”, *Europhys.
Lett.* **84**, 60006 (2008). 査読有
- ⑱ Y. Sughiyama and S. Abe, “Macroscopic proof
of the Jarzynski-Wójcik fluctuation theorem for
heat exchange”, *J. Stat. Mech.: Theory and
Experiment*, P05008 (2008). 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ① S. Abe, “Aftershocks”, at ‘Interdisciplinary
Applications of Statistical Physics & Complex
Networks’, The Kavli Institute for Theoretical
Physics China (March 1-April 1, 2011, Beijing,
China). 3月22日に招待講演
- ② S. Abe, “Universalities of
Earthquake-Network Characteristics”, at The
Second International Workshop on Statistical

Physics and Mathematics for Complex Systems
(October 23-27, 2010, Wuhan, China). 招待講演

- ③ S. Abe, “Operational Quantum
Thermodynamics”, at The first
Franco-Mongolian Workshop on Material
Sciences: Theoretical and Experimental
(August 22-25, 2010, Ulaanbatar, Mongolia). 招
待講演
- ④ S. Abe, (i) “Introduction to Superstatistics”,
(ii) “Complex network approach to seismicity”,
at The IX International Symposium on
Disordered Systems: Theory and Its
Applications (August 20-27, 2009, Karaburun,
Turkey). 招待講演
- ⑤ S. Abe, “Describing Complexity of Seismicity
by Networks”, at European Geosciences Union
General Assembly (EGU2009) (April 19-24,
2009, Vienna, Austria). 招待講演
- ⑥ S. Abe, “Aftershocks”, at The International
Conference on Nonextensive Statistical
Mechanics—Foundations and Applications
(October 27-31, 2008, Foz do Iguaçu, Paraná,
Brazil). 招待講演
- ⑦ S. Abe, “Generalized Stosszahlansatz and
 H -Theorem: Amendment of Nonextensive
Statistical Mechanics”, at The First
International Workshop on “Statistical Physics
and Mathematics for Complex Systems”
(October 23-24, 2008, Le Mans, France). 招待講
演
- ⑧ S. Abe, “Conditional approach to super-
statistics and generalized thermodynamics”, at
The 4th International Conference on Statistical
Physics—Sigmaphi2008 (July 14-18, 2008,
Orthodox Academy of Crete, Kolympari, Chania,
Greece). 招待講演

〔図書〕（計 1 件）

① S. Abe and N. Suzuki, “Earthquake networks, Complex”, in Encyclopedia of Complexity and Systems Science (Springer-Verlag, New York, 2009), pp.184-192.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 純義 (Sumiyoshi Abe)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70184215

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：