

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287098

研究課題名(和文)非平衡散逸系におけるプロトコル依存性の解析とその「熱」機関への応用

研究課題名(英文)The analysis of protocol dependence in non-equilibrium dissipative systems and its application to "thermal" engines

研究代表者

早川 尚男 (Hayakawa, Hisao)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：90222223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：粉体等の非熱的な系を典型例として散逸のある非平衡系の統計力学による一般論を論じる上でプロトコルに依存した振舞が普遍的に見られる。例えば断熱操作に屡々現れる幾何学的位相はその典型例であり、熱機関のフィードバック制御や非熱的な非ガウスノイズの研究や粉体の流れの制御としてのレオロジーの研究もその範囲内にある。それらの性質の機構を明らかにして、「熱」機関に応用しようというのが本研究計画の目的であった。

これらの課題に対して理論的に取り組み、一定の成果を挙げたために3年に年限短縮をした。また研究分担者の一人は多くの褒章に輝き、研究代表者のグループからも物理学会若手奨励賞が出る等、一定の成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：We often observe protocol dependent behavior in non-equilibrium statistical mechanics for dissipative and athermal systems such as granular materials. For example, the geometrical phase which appears in adiabatic treatments is one of typical quantities which exhibit protocol dependence. Also the feedback control of thermal engines, studies and the controls of non-Gaussian noises and the rheology of granular flows are targets of our studies. We aim to construct "thermal" engines by clarifying the mechanisms of these processes.

Because we have obtained reasonable achievements for the theoretical studies of the above mentioned subjects, we shorten the project period from 4 years in the initial planning to 3 years. One of research members got many awards during the support of this scientific grant. We also stress that one of graduates under the supervising of the representative member got the young scientist award of the JPS.

研究分野：非平衡統計力学

キーワード：非平衡散逸系 プロトコル依存性 熱機関 粉体 非ガウスノイズ 幾何学的位相 フィードバック制御

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代に入って非平衡統計力学は面目目を一新し、非線形非平衡現象を本格的に論じる事の出来る段階になってきた。同時に、実験技術の進展に伴い、コロイドや冷却原子系等の少数多体系を実際に光学的にトラップし、操作する事も可能になり、線形非平衡の枠に留まらない非平衡物理の概念が実際に成り立っている事も明らかになっている。その一方、これらの非平衡状態での新しい諸概念の応用上の有用性が未だ明確になっていないくらいがある。その中で申請者等の論文によって、一般に非平衡系のエントロピーは操作の経路、つまりプロトコルに依存し、そのことが量子力学で良く知られる幾何学的位相、即ち操作パラメータの空間での曲率と関係していることを明らかにした。このような考え方を積極的に利用した熱機関のデザインを考える機運が高まっていた。

研究代表者は粉体物理及び散逸系の非平衡統計力学の一般論に興味を持ち、研究を進めていた。一方、研究分担者のうち研究を進めている。一方、研究分担者のうち沙川・渡辺は測定や情報の効果がどのように非平衡統計熱力学に影響を与えるか、不確定性関係式等の基礎的研究について重要な貢献を次々と残していた。上記三人は、申請当時、基研の同一グループに所属し、共同研究の計画を立案するのは自然な流れであった(沙川は交付前の2013年1月に東京大学へ転出)。更に開放系の量子系の専門家である内山を研究分担者に加えて、既に共同研究が始まっており、本研究計画を申請するに至った。

## 2. 研究の目的

研究目的の根幹は、以下の2点にであった：1) プロトコルに依存した非平衡系の種々の問題の解析を通して普遍的数学構造を明らかにする。2) その解析を応用して、有用な「熱」機関のデザインを行う。研究計画

開始当時に我々の論文等を通して非平衡環境下ではエントロピーが経路依存性を持つ事が明らかになっていた。この考え方は個々の対象に限定されない普遍的なものである。このような非平衡系でのプロトコル依存性の存在とそれを利用した「熱」機関のデザインを量子伝導系のみならず、粉体系、コロイド系等も含めた様々な系に対して行っていく予定であった。また非平衡定常状態周りの応答理論や測定の効果がどのように現れるのかにも着目し、新たな非平衡統計力学の建設を試みた。

本研究計画の最終目標は、既に述べた幾何学的性質や測定の効果等の非平衡状態での特性を生かして、応用上有用な「熱」機関をデザインすることにある。ここで「熱」としているのは、非平衡状態でのエネルギー輸送を熱と呼んで良いか疑問なのと、非ガウス系や粉体系等の非熱的な系と呼ばれている系のエネルギー輸送に対しても、そのエネルギーを取り出す機関をデザインしようとしているからであった。

## 3. 研究の方法

本研究計画では、ミクロな量子系から粉体・コロイドといったマクロな古典系迄にわたる広範な非平衡開放系を対象とする。第一段階では、それぞれの対象に応じて量子マスター方程式や測定理論、エンタングルメントを含めた量子暗号理論、一般化確率積分、モード結合理論等の様々な手法を駆使して解析し、共通する幾何学的特性やプロトコル依存性を明らかにしようとした。第二段階では、個々のテーマの成果を踏まえ、それらを融合する事でプロトコル依存性を積極的に利用した「熱」機関のデザインを行った。

## 4. 研究成果

研究代表者は、リウビル方程式に緩和時

間近似を適用し、更に Kirkwood 近似と組み合わせる事でジャミング点近傍での輸送係数の発散をフィッティングパラメータなしに理論的に説明する事に成功した。残念ながらこの線の研究にはプロトコル依存性と熱機関への応用が直接は繋がらなかった。

また非熱的な系の基礎原理を明らかにするという面で非ガウスノイズに関する理論的研究にも多くの成果を残した。従来、ポアソンノイズ等の非ガウスノイズは長時間の観察を行うと中心極限定理の結果ガウスノイズに帰着する事が知られていたが、本研究グループの研究によって、非ガウスノイズとガウスノイズが共存する系では長時間極限でも非ガウスノイズの効果がずっと残る事が明らかになった。またそれに関連して環境を観測するディテクターの運動から環境の状態を逆推定する公式を得た。これらの成果の中心的役割を担った学生(当時)の学位論文が Springer theses に選ばれると共に物理学会若手奨励賞に輝く等の成果が挙げた。

研究分担者のうち沙川の活躍は目覚ましく、3年間に様々な成果を出し、多くの褒章に輝き、彼の名前は広く世界中に知れわたることになった。

#### 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 42 件)

1. Kiyoshi Kanazawa, Takahiro Sagawa, and Hisao Hayakawa, "Heat conduction induced by non-Gaussian athermal fluctuations", Phys. Rev. E **87**, 052124 (2013) (1-10).
2. Tatsuro Yuge, Takahiro Sagawa, Ayumu Sugita and Hisao Hayakawa, "Geometrical Excess Entropy Production in Nonequilibrium Quantum Systems", J. Stat. Phys. **153**, 412-441 (2013).
3. Hisao Hayakawa and Michio Otsuki, "Nonequilibrium identities and response theory for dissipative particles", Phys. Rev. E **88**, 032117 (2013) (1-9),
4. Sosuke Ito and Takahiro Sagawa, "Information Thermodynamics on Causal Networks" Phys. Rev. Lett. **111**, 180603(2013)(1-6).
5. Jung Jun Park, Kang-Hwan Kim, Takahiro Sagawa, and Sang Wook Kim, "Heat Engine Driven by Purely Quantum Information", Phys. Rev. Lett. **111**, 230402 (2013) (1-5)..
6. Ken Funo, Yu Watanabe, and Masahito Ueda, "Thermodynamic work gain from entanglement", Phys. Rev. A **88**, 052319 (2013) (1-7).
7. Ryo Murakami and Hisao Hayakawa, "Effect of elastic vibrations on normal head-on collisions of isothermal spheres", Phys. Rev. E **89**, 012205 (2014) (1-18).
8. Tomohiko G. Sano and Hisao Hayakawa, "Roles of dry friction in the fluctuating motion of an adiabatic piston", Phys. Rev. E **89**, 032104 (2014) (1-7).
9. Michio Otsuki and Hisao Hayakawa, "Avalanche contribution to shear modulus of granular materials", Phys. Rev. E **90**, 042202 (2014) (1-9).
10. É. Fodor, K. Kanazawa, H. Hayakawa, P. Visco, and F. van Wijland, "Energetics of active fluctuations in living cells", Phys. Rev. E **90**, 042724 (2014) (1-11).
11. Kota L. Watanabe and Hisao Hayakawa, "Non-adiabatic effect in quantum pumping for a spin-boson

- system”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 113A01 (2014) (1-25).
12. Satoshi Takada, Kuniyasu Saitoh, and Hisao Hayakawa, “Simulation of cohesive fine powders under a plane shear”, Phys. Rev. E **90**, 062207 (2014) (1-12).
  13. Chikako Uchiyama, “Non-adiabatic effect on quantum heat flux control”, Phys. Rev. E **89**, 052108 (2014) (1-10).
  14. Takahiro Sagawa, “Thermodynamic and Logical Reversibilities Revisited”, J. Stat. Mech., P03025 (2014) (1-33).
  15. Shunsuke Yabunaka and Hisao Hayakawa, “Geometric pumping induced by shear flow in dilute liquid crystalline polymer solutions”, J. Chem. Phys. **142**, 054903 (2015) (1-9).
  16. Kiyoshi Kanazawa, Tomohiko G. Sano, Takahiro Sagawa, and Hisao Hayakawa, “Minimal Model of Stochastic Athermal Systems: Origin of Non-Gaussian Noise”, Phys. Rev. Lett. **114**, 090601 (2015) (1-6).
  17. Kiyoshi Kanazawa, Tomohiko G. Sano, Takahiro Sagawa, and Hisao Hayakawa, “Asymptotic Derivation of Langevin-like Equation with Non-Gaussian Noise and Its Analytical Solution”, J Stat Phys: **160**, 1294-1335 (2015).
  18. Kuniyasu Saitoh, Satoshi Takada and Hisao Hayakawa, “Hydrodynamic instabilities in shear flows of dry cohesive granular particles”, Soft Matter, **11**, 6371-6385 (2015).
  19. Nikolai Brilliantov, P.L. Krapivsky, Anna Bodrova, Frank Spahn, Hisao Hayakawa, Vladimir Stadnichuk, and Jürgen Schmidt, “Size distribution of particles in Saturn’s rings from aggregation and fragmentation”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, **112**, 9536-9541 (2015).
  20. Koshiro Suzuki and Hisao Hayakawa, “Divergence of Viscosity in Jammed Granular Materials: A Theoretical Approach”, Phys. Rev. Lett. **115**, 098001 (2015)(1-5).
  21. Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz, and Takahiro Sagawa, “Thermodynamics of information”, Nature Physics **11**, 131-139 (2015). \*Invited review article in Insight - Non-equilibrium physics.
  22. Sosuke Ito and Takahiro Sagawa, “Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback loop”, Nature Communications, **6**, 7498 (2015) (1-6).
  23. G. Guarnieri, C. Uchiyama, and B. Vacchini, “Energy backflow and non-Markovian dynamics”, Phys. Rev. A **93**, 012118 (2016) (1-10).
- 〔学会発表〕(計 71 件)
1. Hisao Hayakawa, “Non-equilibrium Identities and Nonlinear response Theory for Granular Fluids” an invited talk in the Conference “Complex Dynamics of Granular Systems” at KITPC, Beijing, China (2013年6月2日～7日)
  2. Hisao Hayakawa and Koshiro Suzuki, “Can we use mode-coupling theory to jamming transition?” an invited talk in 7<sup>th</sup> International Discussion Meeting on Relaxation and Complex Systems (2013年7月21日～26日) Barcelona, Spain.
  3. Hisao Hayakawa and Koshiro Suzuki, “Mode-coupling theory for sheared granular liquids” an invited talk in Glastag (2013年10月6日～8日)University of Muenster, Germany
  4. 渡辺優, 「量子測定理論の基礎」 in 量子情報チュートリアルワークショップ (招

- 待講演) (2014年3月22日)京都大学
5. 沙川貴大, 「情報交換プロセスにおけるゆらぎの定理」日本物理学会第69回年次大会(招待講演)(2014年3月27日~30日)東海大
  6. Takahiro Sagawa, “Initiating Chemical Motors with Information Motors” an invited talk in 2013 Taiwan International Workshop on Biophysics and Complex Systems (2013年7月17日~20日) at Taipei, Taiwan
  7. Takahiro Sagawa, “Fluctuation theorem for information exchanges” an invited talk in Statphys 25 (2013年7月22日~26日) Seoul, Korea
  8. Takahiro Sagawa, “Role of Mutual Informaion in Entropy Production under Information Exchanges” an invited talk in East Asia Joint Seminars on Statistical Physics (2013年10月21日~24日)京都大学基礎物理学研究所
  9. Takahiro Sagawa, “Fluctuation Theorem with Information Exchange”, an invited talk in Sovay workshop on “Thermodynamics of Small Systems” (2013年12月2日~4日) at Brussels, Belgium
  10. Hisao Hayakawa, “Rheology of dense granular liquids: A mode coupling approach” an invited talk in 29<sup>th</sup> International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (2014年7月13日~18日)西安、中国
  11. Hisao Hayakawa, “Rheology of “Dense” Granular Flow: Drag law of a moving tracer” an invited talk in Continuous models and Discrete systems 13 (2014年7月21日~25日) at University of the Utah, Salt-Lake City, UT, USA
  12. Hisao Hayakawa, “Non-equilibrium Statistical Mechancs of Sheared Dense Granular Flow: fluctuation theorem and mode-coupling theory for nonlinear response” an invited talk in Frontiers of Statistical Mechanics: from Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter (2015年2月4日~17日) 京都基礎物理学研究所
  13. Hisao Hayakawa, “Fluctuating motion of a tracer under the influence of dry friction and/or non-Gaussian noise” an invited talk in Frontiers of Statistical Mechanics: from Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter (2015年2月4日~17日) 京都大学基礎物理学研究所
  14. Hisao Hayakawa, an invited lecture in Summer & Winter School of Instute of Natural Sciences (2015年3月30日~4月2日) 上海交通大学、中国
  15. Takahiro Sagawa, “Information Thermodynamics ib Causal Networks” an invited talk in the 6<sup>th</sup> KIAS Conference on Statistical Physics “Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems (2014年7月8日~11日) at Seoul, Korea
  16. Takahiro Sagawa, “ Quantum-information Thermodynamics ” an invited talk in YITP workshop on Quantum Information Physics (YQIP2014) (2014年8月4日~7日) 京都大学基礎物理学研究所
  17. Takahiro Sagawa, “Information Thermodynamics on Causal Networks” an invited talk in Thermodynamics, Large Deviation and Transport (2014年9月17日~18日) 京都大学基礎物理学研究所
  18. Takahiro Sagawa, “Nonequilibrium Thermodynamics of Quantum Information Processing” an invited talk in YKIS2014: Nonequilibrium Phenomena in Novel Quantum Systems (2014年12月3日~5日) 京都大学基礎物理学研究所
  19. Takahiro Sagawa, “Fluctuation Theorem for Information Processing” an invited talk in 2015 Berkley Mini Statistical Mechanics Meeting (2015年1月9日~11日) Berkley, CA, USA
  20. Takahiro Sagawa, “Thermodynamics of Nonequilibrium Systems with Feedback Control” an invited talk in APS March meeting (2015年3月2日~6日) at San Antonio, Texas, USA
  21. 渡辺優, 「孤立量子系における緩和現象とそのタイムスケール」 an invited talk in 第4回 Quantum Theory & Technology unofficial meeting (2015年1月11日~12日) 高知工科大
  22. Chikako Uchiyama, “Nonadiabatic effect on the quantum heat flux control” an invited talk in Quantum Control of Light and Matter (QCLM2015) (2015年1月14日~16日) 沖縄国際大
  23. 早川尚男, 大槻道夫, “Avalanches and their contribution for sheared granular flows” an invited talk in Particles 2015 (2015年9月28日~30日) Barcelona, Spain
  24. 早川尚男, 鈴木功至郎, “Theory of dense granular flows for divergence of the viscosity” an invited talk in New Frontiers in Non-equilibrium Physics of Glassy Materials, Japan-France joint seminar (2015年8月11日~14日) 京都大学基礎物理学研究所

25. 早川尚男、「剪断粉体系でのジャミング転移近傍での粘性率の発散に関するミクロ理論」招待講演 in ガラス転移とその周辺の科学 (2015年7月30日~8月1日) 東京大学物性研
26. 早川尚男, “Divergence of viscosity in jammed granular materials: a theoretical approach” an invited talk in East Asia Joint Seminar on Statistical Physics 2015 (2015年10月14日~17日) at KIAS, Seoul, Korea
27. 早川尚男、「剪断粉体系でのジャミング転移近傍での粘性率の発散」招待講演 in 第6回計算統計物理学研究会 (2015年11月21日~22日)名古屋大学
28. 早川尚男、鈴木功至郎 “Theory of jammed granular flow under a plane shear: a quantitative description of the divergence of viscosity” an invited talk in Plasticity 2016 (2016年1月3日~9日) Hawaii, USA
29. 沙川貴大, “Nonequilibrium Thermodynamics of Quantum Information Processing” an invited talk in the 10<sup>th</sup> Principles and Applications of Control in Quantum Systems Workshop 2015 (2015年7月20日~24日) at Sydney, Australia
30. 沙川貴大, “Thermodynamics if Autonomous Information Processing” an invited talk in KIAS workshop on Quantum Information and Thermodynamics (2015年11月25日~28日) at Busan, Korea
31. 沙川貴大, “Maxwell’s Demon in Biochemical Signal Transduction” an invited talk in the long term workshop on New Frontiers in Non-equilibrium Physics (2015年7月21日~8月23日) 京都大学基礎物理学研究所
32. 内山智香子, “Non-adiabatic effect on the quantum heat flux control” an invited talk at Foundation of Quantum Transport in Nano-Science (2015年8月18日~20日) 山梨大

〔図書〕(計 5 件)

1. R. Klages, W. Just and C. Jarzynski edit, “Nonequilibrium Statistical Physics of Small Systems: Fluctuation Relations and Beyonds” (Wiley-VCH, Weinheim, 2013) in total 418 pages: Takahiro Sagawa writes one chapter of this book (34 pages).
2. Yu Watanabe, “Formulation of Uncertainty Relation between Errors and Distribution in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory ” (Springer-Verlag, Berlin, 2014) 122pages.

3. 沙川貴大、上田正仁、「量子測定と量子制御」(サイエンス社, SGC ライブラリ 123, 2016) 210 pages.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 出願年月日 :  
 国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 取得年月日 :  
 国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等  
 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川尚男 (HAYAKAWA, Hisao)  
 京都大学・基礎物理学研究所・教授  
 研究者番号 : 90222223

(2) 研究分担者

沙川貴大 (SAGAWA, Takahiro)  
 東京大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号 : 60610805

内山智香子 (UCHIYAMA, Chikako)  
 山梨大学・総合研究部・教授  
 研究者番号 : 30221807

渡辺優 (WATANABE, Yu)  
 京都大学・基礎物理学研究所・助教  
 研究者番号 : 80633271

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

(4) 研究協力者

( )