

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540384

研究課題名（和文） 高密度粒子系の相関効果と非平衡相転移の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical studies on correlation effects and non-equilibrium phase transitions for high density particles systems

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

研究成果の概要（和文）：

ジャミング転移やガラス転移を含めた高密度粒子系の非平衡相転移の理論的研究を進め、スケーリング理論、粒子摩擦によるヒステリシス効果や時間空間相関関数の長距離効果を論じる広義のモード結合理論等を発展させた。更に詳細釣り合いのない粉体系のゆらぎの定理を発展させ、久保公式との関係を明らかにした。また粉体単体の衝突を解析して負の反発係数が出る事を明らかにした。その他、ジャミング転移の概念を他の系へ適用した。

研究成果の概要（英文）：

Through the theoretical analysis on non-equilibrium phase transitions such as jamming transitions and glass transitions for high density systems, we have developed a scaling theory for jamming transition, and clarified the existence of hysteresis on jamming for frictional grains. We have also developed a generalized mode-coupling theory for spatial-temporal correlation function for dense systems. Moreover, we have demonstrated that the fluctuation theorem can hold even for granular systems which do not have any detailed balance, and discussed the relationship with Green-Kubo formula. In addition, we have found that there is a negative restitution coefficient for collision for granular grains, and applied the concept of the jamming for some other systems.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：ゆらぎ、散逸、粉体、ジャミング転移、ガラス転移、反発係数、非ガウス、ヒステリシス

1. 研究開始当初の背景

高密度粒子系を急冷するとガラス転移が生じ、一方、温度ゼロ極限で外力を有限から

ゼロに近づけた極限でジャミング転移が生じ、両者の類似性が指摘されていた。本研究計画はその両者を統一的に扱い、その数理構造を明らかにする事を主目的としていた。

また、その背景にある物理法則を明らかにするために「ゆらぎの定理」を含めた基礎理論、その輸送現象への応用、液体論特にモード結合理論の適用、更に粉体系ではその粒子単体の衝突ダイナミックスの研究が関連分野として重要とされていた。

特に報告者のグループでは本研究計画がスタートした段階でジャミング転移のスケーリング理論とガラス転移に関する場の理論を発表し、また粉体単体の非弾性衝突の研究も含めて世界的にも注目を集めていた。

2. 研究の目的

本研究の主目的は、ガラス転移やジャミング転移といった高密度粒子系の非平衡相転移双方を記述できる統一理論の構築である。2009年初頭に発表されたジャミング転移のスケーリング理論では現象論を繋ぎ合わせて転移の臨界指数を推定しただけが、ミクロな理論が求められていた。一方でガラス転移のモード結合理論では現実には存在しない非エルゴード転移の存在を予言してしまうので、その改善を求められていた。両者の問題点を解決すると同時に高密度粒子系の非平衡相転移の新しい道筋が見つかるのではないかとと思われる。

同時に高密度粒子の非平衡物理の周辺分野、粉体系のゆらぎの定理、粉体単体の衝突理論、量子効果等の理論的整備とジャミング転移等の概念を更に他の系に適用するという事が求められていた。

3. 研究の方法

研究の手法は、主として(広い意味の)モード結合理論、(広義の)平均場理論、更に分子動力学法(MD)によるシミュレーションである。その他、ゆらぎの定理等で使われるLiouville方程式で成立する恒等式の精査や断熱近似も並行して用いた。

4. 研究成果

雑誌に論文として公表できた研究成果としては以下のものが挙げられる。

- 1) ジャミング転移でのスケーリング理論と摩擦によるヒステリシス効果(論文1, 6, 9, 17)
- 2) 非ガウスゆらぎに対する数学的整備とゆらぎのエネルギー論(論文1)
- 3) ジャミング転移の粒子輸送、特に蠕動系への応用(論文3, 15)
- 4) 高密度系も含めて非平衡エントロピーの経路依存性(論文4)
- 5) ジャミング密度より薄い粉体流の弱非線形解析や相関効果、ロングタイムテール等

(論文5, 13, 18)

6) 粉体単体やナノクラスターの衝突現象とその基盤への影響(論文7, 12, 16)。特に負の反発係数の存在を明らかにした論文7は要注目である。

7) 散逸系へのゆらぎの定理の拡張や久保公式との関係、量子系への応用(論文8, 10, 11)。特に詳細釣り合いのない粉体系でのゆらぎの定理の発見(論文11)は大きな貢献である。

8) 粉体ガスの微小重力実験(論文14)

等である。このうち2), 4)は何れも基礎的な概念の提出であり、今後重要になると思われるが、本研究計画とは直接の関係が薄い。また3), 8)も周辺分野の応用という性格が強い。直接、研究計画と直結した研究成果として、まず1), 5)そして6)や7)がその基礎としての成果となる。

その他、プレプリントやProceedings 迄含めると

9) 散逸のある高密度せん断粒子系のモード結合理論

10) 散逸のない粒子系の急冷によるジャミング転移の研究

等も成果として挙げて良い。

しかし、ガラス転移に関しては3年間に特筆すべき成果がなかった事は残念である。無論、特に9), 10)はガラス転移と直結しているし、未だ論文としてまとめるに至っていないガラス転移に関する研究はあるのであるが、ガラス転移研究に関して成果が乏しかったという事実は覆せないだろう。

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)(全て査読有)

1. M. Otsuki and H. Hayakawa, Rheology of sheared granular particles near jamming transition, to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl. (2012).
2. K. Kanazawa, T. Sagawa and H. Hayakawa, Stochastic Energetics for non-Gaussian Processes, Phys. Rev. Lett. **108**, 210601 (2012) 1-5.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.210601>
3. N. Yoshioka and H. Hayakawa, Phase transition in peristaltic transport of frictionless granular particles, Phys. Rev. E **85**, 031302 (2012) 1-7.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.85.031302>
4. T. Sagawa and H. Hayakawa, Geometrical expression of excess entropy production, Phys. Rev. E **84**, 051110 (2011) 1-6.

- <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.84.051110>
5. K. Saitoh and H. Hayakawa, Weakly nonlinear analysis of two dimensional sheared granular flow, *Granular Matter* **13**, 697–711 (2011).
DOI: 10.1007/s10035-011-0283-2
 6. M. Otsuki and H. Hayakawa, Critical scaling near jamming transition for frictional granular particles, *Phys. Rev. E* **83**, 051301 (2011) 1–9.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.83.051301>
 7. K. Saitoh, A. Bodrova, H. Hayakawa and N. V. Brilliantov, Negative Normal Restitution Coefficient Found in Simulation of Nanocluster Collisions, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 238001 (2010) 1–4.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.105.238001>
 8. H. Hayakawa, Generalized Green-Kubo Formula for a Dissipative Quantum System, *Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 184*, 545–556 (2010).
DOI : 10.1143/PTPS.184.545
 9. M. Otsuki, H. Hayakawa and S. Luding, Behavior of Pressure and Viscosity at High Densities for Two-Dimensional Hard and Soft Granular Materials, *Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 184*, 110–133 (2010).
DOI : 10.1143/PTPS.184.110
 10. S.-H. Chong, M. Otsuki and H. Hayakawa, Representation of the Nonequilibrium Steady-State Distribution Function for Sheared Granular Systems, *Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 184*, 72–87 (2010).
DOI : 10.1143/PTPS.184.72
 11. S.-H. Chong, M. Otsuki and H. Hayakawa, Generalized Green-Kubo relation and integral fluctuation theorem for driven dissipative systems without microscopic time reversibility, *Phys. Rev. E* **81**, 041130 (2010) 1–4.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.81.041130>
 12. K. Saitoh and H. Hayakawa, Motion of a free-standing graphene sheet induced by a collision with an argon nanocluster: Analyses of the detection and heat-up of the grapheme, *Phys. Rev. B* **81**, 115447 (2010) 1–5.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.81.115447>
 13. M. Otsuki and H. Hayakawa, Unified description of long-time tails and long-range correlation functions for sheared granular liquids, *Euro. Phys. J. Special Topics*, **179**, 179–195 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2010-01202-7>
 14. S. Tatsumi, Y. Murayama, H. Hayakawa and M. Sano, Experimental study on the kinetics of granular gases under microgravity, *J. Fluid Mech.* **641**, 521–539 (2009).
DOI:10.1017/S002211200999231X
 15. C. Nakajima and H. Hayakawa, Molecular Transport through a Bottleneck Driven by External Force, *Prog. Theor. Phys.* **122**, 1377–1390 (2009).
DOI : 10.1143/PTP.122.1377
 16. K. Saitoh and H. Hayakawa, Simulation of depositions of a Lennard-Jones cluster on a crystalline surface, *Prog. Theor. Phys.* **122**, 1081–1094 (2009).
DOI : 10.1143/PTP.122.1081
 17. M. Otsuki and H. Hayakawa, Critical behaviors of sheared frictionless granular materials near the jamming transition, *Phys. Rev. E* **81**, 031309 (2009) 1–12.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.80.011308>
 18. M. Otsuki and H. Hayakawa, Long-time tails in sheared fluids, *J. Stat. Mech.* (2009) L08003, 1–8.
DOI:10.1088/1742-5468/2009/08/L08003
- [学会発表] (計 31 件)
1. H. Hayakawa and T. Sano, Three dimensional simulation for granular jet, at Dust and Grains in low gravity and space environment, at ESA in the Netherlands, April 4, 2012
 2. H. Hayakawa and T. Sagawa, Nonequilibrium entropy and response theory of dissipative particles, at East Asia Joint Seminar on Statistical Physics 2012, March 18, 2012 at Suzhou, China
 3. H. Hayakawa and K. Saitoh, Nonlinear analysis of sheared granular flow: Beyond granular hydrodynamics, at IUTAM Symposium “Mobile Particulate System” at Bangalore, India, January 25, 2012.
 4. H. Hayakawa and M. Otsuki, Jamming transition at finite temperature, at Unifying Concepts in Glassy Physics V, IHES, Paris, France, December 16,

- 2011.
5. H. Hayakawa, Response theory around a non-equilibrium steady state in terms of full-counting statistics, at Japan-France joint seminar on “Jamming, glasses and phase transitions” at IHES, Paris, December 7, 2011.
 6. H. Hayakawa, T. Sagawa and K. Saitoh, Response theory around a non-equilibrium steady state in terms of full-counting statistics, at Tamura Memorial Symposium, at 大阪府立大 December 4 (2011).
 7. H. Hayakawa and K. Saitoh, Amplitude equation for weakly sheared granular flow, at Nonequilibrium dynamics in astrophysics and material science, October 31–Nov. 3, 2011, 京都大学基礎物理学研究所
 8. 早川尚男, 非平衡定常状態周りの線形応答理論, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月23日、富山大学.
 9. H. Hayakawa, Granular hydrodynamics: an overview and future perspective, at Fluctuations and response in granular materials, Aspen, CO, USA, May 29, 2011.
 10. 早川尚男 and A. Baskran, レーン形成の運動論、非平衡系の物理-ミクロとマクロの架け橋-, 京都大学基礎物理学研究所, 2011年8月18–20日.
 11. H. Hayakawa and M. Otsuki, Subcritical behavior in jamming transition of frictional grains, Kick-off meeting of the core-to-core program on international research network for non-equilibrium dynamics of soft matter, 京都大学理学部, April 20, 2011
 12. H. Hayakawa, Fluctuation theorem and generalized Green-Kubo formula for quantum dissipative systems, at DMQS2010, 東京大学山上会館, 2011年2月16日.
 13. 早川尚男, Fluctuation theorem for dissipative particles, 非平衡ソフトマター物理学の創成第5回領域研究会, 東京大学弥生会館, 2011年1月7日.
 14. H. Hayakawa, Fluctuation theorem for system of dissipative particles, in Recent progress in physics of dissipative particles, 京都大学基礎物理学研究所, 2010年11月24日.
 15. 早川尚男, Negative restitution coefficient in collision of nanoclusters, at 粉体物理と惑星科学の接点、神戸大学, 2010年11月22日.
 16. 早川尚男, 散逸系のゆらぎの定理と一般化久保公式, at 非平衡系の物理-非平衡ゆらぎと集団挙動, 京都大学基礎物理学研究所, 2010年11月19日.
 17. 早川尚男、大槻道夫、鄭誠虎, 散逸粒子系における非平衡定常状態に対する応答理論, 日本物理学会秋季大会, 大阪府立大, 2010年9月24日.
 18. H. Hayakawa, General Nonsense Approach of Dissipative Systems - Fluctuation theorem and generalized Green-Kubo formula-, Dynamics of the Glass/Jamming Transition in celebration of the 80th birthday of Prof. Kyozi Kawasaki at Busan, Korea, September 8, 2010.
 19. H. Hayakawa and M. Otsuki, Scaling for frictional jamming, International Symposium on non-equilibrium soft matter 2010, 奈良, 2010年8月17–20日.
 20. H. Hayakawa, Fluctuation theorem and generalized Green-Kubo formula for quantum dissipative systems, Physics and chemistry in quantum dissipative systems, 京都大学基礎物理学研究所, 2010年8月9日.
 21. H. Hayakawa, Non-equilibrium mode-coupling theory of sheared granular liquids, Gordon Research Conference “Granular & granular fluid flow” at Colby College, ME, USA, June 23, 2010.
 22. 早川尚男, 散逸量子系における一般化グリーン久保公式とゆらぎの関係式、日本物理学会第65回年次大会、岡山大学, 2010年3月23日.
 23. H. Hayakawa, M. Otsuki and S. Luding, Jamming transition of granular materials : A nonequilibrium phase transition from a solid to a liquid and the analogy to the discharge process, 「プラズマ生成・電離過程に関わる突発性と構造形成」京都大学時計台、2010年3月15, 16日.
 24. 早川尚男, 大槻道夫 and S. Luding, ジャミング点近傍のレオロジー：圧力と粘性率の発散, 科研費特定領域研究「ソフトマター物理」A03 班班会議, 京都大学基礎物理学研究所, March 13, 2010.
 25. 早川尚男、大槻道夫 and S. Luding, ジャミング転移のレオロジー：圧力と粘性率の発散、「古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ」、東京大学弥生講堂アネックス、2010年2月12–14日.
 26. 早川尚男, 散逸定常系のゆらぎの定理、「量子系における双対性とスケール」京

- 都大学基礎物理学研究所, 2009年11月4日.
27. 早川尚男、大槻道夫、鄭誠虎, Nonequilibrium Mode-coupling Theory for Sheared Granular Liquids-long range correlation and long fast decay of correlation, 日本物理学会 2009年秋大会, 熊本大学, 2009年9月28日.
 28. H. Hayakawa, S.-H. Chong and M. Otsuki, Nonequilibrium Mode-coupling Theory for Sheared Granular Liquids, IUTAM-ISIMM Symposium on Mathematical Modeling and Physical Instances of Granular Flow, Reggio Calabria, Italy, 2009年9月14日.
 29. H. Hayakawa, Fluctuation Relations of Dissipative Systems, in Frontiers in Nonequilibrium Physics: fundamental theory, glassy & granular materials and computational physics, 京都大学基礎物理学研究所 2009年8月21日.
 30. H. Hayakawa, Fluctuation Relations without microscopic reversibility, YKIS2009 Frontiers in Nonequilibrium Physics, 京都大学基礎物理学研究所 2009年7月31日.
 31. 早川尚男, 大槻道夫, ジャミング転移近傍のレオロジー、科研費特定領域研究「ソフトマター物理」第4回領域研究会, 北海道大学, 2009年7月4日.

[図書] (計 2 件)

1. 早川尚男, “「統計物理学」研究者からのメッセージ” (講談社基礎物理学シリーズ第11巻 現代物理学の世界 第2部 「トップ研究者からのメッセージ」二宮正夫編, 2010) pp. 80-89.
2. Hisao Hayakawa, Song-Ho Chong and Michio Otsuki, Nonequilibrium liquid theory for sheared granular liquids in IUTAM-ISIMM Symposium on Mathematical Modeling and Physical Instances of Granular Flow, pp.19-30 edited by J. D. Goddard, J. T. Jenkins and P. Govine (AIP vol.1227, New York, 2010).

[その他]

- 1). 論文 7 は Phys. Rev. Lett. の editors' choice に選ばれた。
- 2). 第 4 回物理学会若手奨励賞(2010)に共同研究者である國仲寛人氏が選ばれた。氏の受賞対象論文 3 篇は何れも報告者との共著論文である。
- 3). 2009 年には 5 週間にわたる滞在型国際研究集会 Frontiers in nonequilibrium physics を主宰した。その他、2010 年、2011 年にも

国際会議を一つづつ主宰している。

4). 海外の多くの国際会議や著名大学のセミナーで招待講演を行ったばかりでなく、2011 年度には 3 つの海外の国際会議での組織委員を務めた。またフランスの学生の学位論文審査に関わり、パリでの公聴会に出席予定である(2012 年 6 月)。このようにこの 3 年間で海外における存在感を確実に増した事が大きな成果であると思われる。

5). 2011 年 4 月より Progress of Theoretical Physics の編集長を務めており、同時に雑誌 Granular Matter の edior を務めている。更に AEMMG (“Association pour l’ Etude de la MicroMécanique des Milieux Granulaires”) の committee member の一人になっており、国際的コミュニティの整備に重要な役割を果たすようになってきている。

6). 日本物理学会刊行委員会委員、物性委員会幹事、湯川記念財団理事、物理系学術誌刊行センター運営協議会委員等を務めた。更に物理学会領域副代表、代表等に就任予定であり、国内に於いても研究者コミュニティの盛り立てに一役を買っている。

7). 本、物理学会誌、雑誌「数理科学」等に各種解説記事を執筆し、科学の啓蒙に務めた。日本語の解説には

7-1) 早川尚男、「学会誌の記事を広く楽しく読むために」第 12 回, 日本物理学会誌 66 巻 1 号, pp.65-67 (2011).

7-2) 早川尚男、非平衡系における対称性の破れ、数理科学 2010 年 12 月号 (No. 570) pp. 53-58.

7-3) 早川尚男、シュレディンガー：統計熱力学の定式化 数理科学 2009 年 9 月号 (No. 555) pp. 33-38.

等がある。

8) 研究成果の発表を発信するホームページは

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hisao/>にある。

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

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：