

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K21881

研究課題名(和文)揺らぎの定理を満たす非線形揺動流体力学の構築

研究課題名(英文)Non-linear fluctuating hydrodynamics based on fluctuation theorem

研究代表者

平野 哲文(Hirano, Tetsufumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40318803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：非平衡統計物理学における金字塔の一つである「揺らぎの定理」を、背景が膨張しつつ局所熱平衡が保たれる系に適用し、その成果を高エネルギー原子核衝突反応に適用を目指した。まず同じ方程式系としてより簡単な記憶効果を含むランジュバン系と熱揺らぎを含むLCR回路系の解析を行った。特に流体揺らぎと臨界揺らぎが一次元膨張系における定式化を行い、その因果的なダイナミクスを記述した。また一般化された相対論的流体方程式に対して、流体揺らぎからくる制限を議論した。これらの系において「揺らぎの定理」を満たすために、膨張の影響を含む一般化された揺動散逸関係が必要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非平衡統計物理学の揺らぎの定理において揺動流体を扱う例はそれほど多くない。研究代表者らは高エネルギー原子核衝突反応におけるクォークグルーオンプラズマ流体を扱う中で、この系における揺らぎの定理の適用可能性に先鞭をつけ、学際的な領域の研究を進めた。今後、相対論的揺動流体力学が高エネルギー原子核衝突反応のダイナミクスを記述するうえで中心になるにあたり、その基礎的な土台の一部を築いたという意味で意義がある。

研究成果の概要(英文)：We applied the "fluctuation theorem", one of the milestone in non-equilibrium statistical physics, to a system in which local thermal equilibrium is maintained while the background expands. We aimed to apply the results to high-energy nuclear collision. First, we analyzed the Langevin system, which includes a simpler memory effect, and the LCR circuit system, which includes thermal fluctuations, as the same equation system. In particular, we formulated hydrodynamic fluctuations and critical fluctuations in a one-dimensional expanding system, and described their causal dynamics. We also discussed the limitations caused by hydrodynamic fluctuations for generalized relativistic fluid equations. It was suggested that a generalized fluctuation dissipation relation that includes the effect of expansion is necessary to satisfy the "fluctuation theorem" in these systems.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：揺らぎの定理 相対論的揺動流体力学 一般化された揺動散逸関係 クォークグルーオンプラズマ 因果律

1. 研究開始当初の背景

宇宙の始まりに存在した極限素粒子物質「クォークグルーオンプラズマ」の物性を研究する目的で高エネルギー原子核衝突実験が行われてきており、その実験結果を現象論的に解析し、輸送係数であるずれ粘性や体粘性、拡散係数などを抽出する上で相対論的流体力学が重要な役割を果たしてきた。相対論的流体力学の枠組みは、近年、時空の各点で熱揺らぎの影響を取り入れた「揺らぐ流体力学」として発展しているものの、非平衡統計力学における「揺らぎの定理」との関連は自明ではなかった。そこで本研究課題では、揺らぎの定理と矛盾しない「揺らぐ相対論的流体力学」の構築を目指す。非平衡統計力学の発展と素粒子原子核物理学の発展の交差する学際的課題として位置づけられ、クォークグルーオンプラズマ物性の理解を促進されることが期待されていた。

2. 研究の目的

本研究は非平衡統計力学で近年発展してきた「揺らぎの定理」をキーワードに、素粒子物性物理学の土台構築とその非平衡統計力学へのフィードバックを目指す学際的な課題である。揺らぎの定理を平衡近傍の状態に適用すると線形応答理論が導かれる。そのため、線形領域を含むより広範な輸送現象、特に平衡から離れた状態の記述に有効であることを示唆している。高エネルギー原子核衝突反応で生成された極限素粒子物質「クォークグルーオンプラズマ」の時空発展を記述する「揺らぐ流体力学」におけるエントロピー生成に注目すると、背景温度が非一様・時間変化することに起因する非線形性から、その枠組みが「揺らぎの定理」と無矛盾に構築されているかは自明ではない。そこで「揺らぎの定理」に無矛盾な枠組みの構築を目指し、現代的な非平衡統計力学の成果を踏まえ、今後の素粒子物性論を展開するための土台を確固とし、さらには非平衡統計力学へのフィードバックも目指すことが本研究課題の目的である。また、相対論的流体力学に基づく高エネルギー原子核衝突反応の精密な記述に向け、空間 3 次元における一般の膨張系に対して、揺らぎの定理が成立するように流体揺らぎを取り入れた相対論的流体数値シミュレーションを構築する。この枠組みを用いて、高エネルギー原子核衝突反応で(エントロピー量に対応する)生成された粒子数の分布の解析を行い、輸送係数を中心とした QGP の物性量の導出を行う。

3. 研究の方法

揺らぐ流体力学における運動方程式と同じ確率微分方程式でありながら、簡単かつ非自明な例として、背景温度が時間発展する場合における緩和時間を含む 1 粒子に対する一般化されたランジュバン方程式系を取り扱い、その時間発展を記述した。そこでエントロピー生成率を解析することで、揺らぎの定理の成立の成否を確認し、特にそのような場合における揺動散逸関係を一般化する。また、もう一つの簡単かつ非自明な例は、熱雑音を含む LCR 回路系の背景温度が時間的に変化する場合である。このような系は、高エネルギー原子核衝突反応のような大規模な実験に頼らなくても、理論の妥当性を実験的に確かめる手段を提供する意味で非常に重要である。

相対論的流体力学の解の一例として、流速が 3 次元空間中の一つの座標に比例するような 1 次元ハッブル膨張系において系の緩和過程や背景温度場の揺らぎの影響に注目し、揺らぎの定理の成立の可否について定量的に調べる。また、クォークグルーオンプラズマ相からハドロン相へ 2 次相転移を起こす際のエントロピー生成に対する影響も調べる。また、逆に「揺らぎの定理」が普遍的に成立するためには、背景温度場が時間的にも空間的にも変動するような非線形領域において揺動散逸関係をどのように拡張すべきかの議論も行う。この点は相対論的流体力学に留まらず、一般の非線形流体系における揺動散逸関係にも当てはめることが可能である。流体場に対するランジュバン描像からフォッカープランク描像への変換を行うことで揺らぎの定理を見通し良くすることも検討する。

4. 研究成果

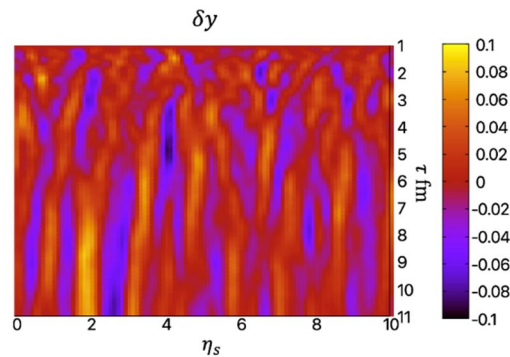
(1) 1次元 1 粒子に対するブラウン運動を考え、記憶項を含む一般化されたランジュバン方程式で記述される系に対し、背景の温度が時間発展する場合を想定した「一般化された揺動散逸関係」の導出を行った。次に、この微分方程式系が、回路理論における熱雑音を含む LCR 回路方程式と同等であることに注目し、この系における「一般化された揺動散逸関係」の導出と、その検証を目指した解析を行った。特に、熱雑音の応答を見るために、コンデンサーに蓄えられる電荷 Q の時間相関関数を求め、コイルの自己インダクタンス L と抵抗 R で表される緩和時間、及び、背景の温度の時間発展を特徴付ける時間変数を用いて、その振る舞いを調べた。この二つの例に置いて、緩和現象と背景の温度変化の特徴的なスケールが通常熱浴中における揺動散逸関係を越えた関係式を生み出し、それを適当な状況のもとで実験的にも検証できることが分かった。

(2) 高温、高密度 QCD 物質が膨張する際の臨界点周りの振る舞いについて、臨界揺らぎも含む場合の「一般化された揺動散逸関係」の導出を目指した。従来、バリオン数密度の拡散現象が注目されてきたが、それを記述する枠組みを「秩序変数の揺らぎとの競合」と「因果律を守るため

の揺らぎの緩和」という観点で拡張を行った。従来の枠組みでは、熱力学的な力に対する応答が瞬時に起こるため、相転移に起因したバリオン数密度の拡散が瞬時に起こってしまったが、現代的な相対論的流体力学で重要視された緩和項を取り入れることによって、揺らぎの伝播が有限の速度で起こることを記述することができた。また、緩和時間によっては、早い変数である秩序変数の揺らぎの影響も現れることが分かった。

(3) 上記の臨界揺らぎのベースとなる熱揺らぎのダイナミクスを調べるために、高エネルギー重イオン衝突反応において衝突軸方向に次元膨張する系に対して粘性の影響も含む背景の膨張とその周りの揺らぎに分離し、摂動の一次の範囲内で一般化されたバランス方程式を導出した。この摂動の一次の方程式は流体揺らぎによって駆動される確率微分方程式となっている。

これにより任意の構成方程式を採用することができるようになり、特に、現代的な相対論的流体力学で重要な因果律を守る緩和項を含む系を取り扱うことができるようになった。適当な初期条件のもとで揺らぎの時空発展を記述すると、エネルギー密度や流速のような遅いモードの揺らぎの構造が、かなり早い時刻で凍結する様子が見て取れた。このことは揺らぎが緩和する時間スケールと膨張の時間スケールの競合によっておこると考えられる。右の図は、



ある一事象における流速の揺らぎ(δy)の座標ラピディティ(y)依存性の固有時間(η_s)発展を表す。初期時刻に近い ~ 3 fm くらいに表された揺らぎの濃淡が比較的遅い時刻(~ 10 fm)まで残ることを示している。このことは終状態の粒子相関関数から、早い時刻に生成されたクォークグルーオンプラズマの物性に迫れる可能性を示唆していることが分かった。

(4) 一般化された相対論的流体方程式に対する流体揺らぎからの制限について研究を進めた。近年、任意の局所慣性系に対する一般化された相対論的流体方程式が導出された。しかし、平衡状態の極限でエントロピーが最大値を取らない、別の言い方をするとエントロピーが最大値を取るにも関わらずエネルギー密度の補正項にあたる散逸量が有限であるという問題がある。そこで、流体揺らぎの観点からこの系を解析すると、散逸量の揺らぎの平均が有限であることにより、系が不安定になることが判明した。これにより一般化された相対論的流体方程式には流体揺らぎの観点から考慮されるべき条件が存在し、それが定式化に与える制限を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakai A., Murase K., Fujii H., Hirano T.	4. 巻 16
2. 論文標題 Space-time Evolution of Critical Fluctuations in an Expanding System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5506/APhysPolBSupp.16.1-A155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Azumi Sakai, Koichi Murase, Tetsufumi Hirano	4. 巻 829
2. 論文標題 Effects of hydrodynamic and initial longitudinal fluctuations on rapidity decorrelation of collective flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137053 ~ 137053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2022.137053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Azumi Sakai, Koichi Murase, Tetsufumi Hirano	4. 巻 1005
2. 論文標題 Rapidity decorrelation caused by hydrodynamic fluctuations and initial longitudinal fluctuations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121969 ~ 137053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysa.2020.121969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujii Shin-ei, Hirano Tetsufumi	4. 巻 109
2. 論文標題 Causal hydrodynamic fluctuations in a one-dimensional expanding system	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024916 ~ 024916
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.109.024916	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuroki Kenshi, Sakai Azumi, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 842
2. 論文標題 Hydrodynamic fluctuations and ultra-central flow puzzle in heavy-ion collisions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137958 ~ 137958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.137958	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Azumi, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 102
2. 論文標題 Rapidity decorrelation of anisotropic flow caused by hydrodynamic fluctuations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064903 ~ 064903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.064903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 藤井真栄, 平野哲文
2. 発表標題 膨張系における流体揺らぎのダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村奏, 平野哲文, 藤井宏次
2. 発表標題 一般化された構成方程式に対する揺動散逸関係による制限
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Azumi Sakai, Koichi Murase, Hirotsugu Fujii, Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Space-time evolution of critical fluctuations in an expanding system
3. 学会等名 Quark Matter 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂井あづみ, 平野哲文, 藤井宏次, 村瀬功一
2. 発表標題 1次元膨張系における臨界揺らぎの時空発展
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井真栄, 平野哲文
2. 発表標題 膨張系における因果的な流体揺らぎのダイナミクス
3. 学会等名 J-PARC ハドロン研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井真栄, 平野哲文
2. 発表標題 (1+1)次元膨張系における因果律を守る 流体揺らぎ
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井真栄, 平野哲文
2. 発表標題 Dynamics of causal hydrodynamic fluctuations in an expanding system
3. 学会等名 第40 回Heavy Ion Cafe
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井真栄, 平野哲文
2. 発表標題 膨張系における流体揺らぎの2 粒子相関 への影響
3. 学会等名 日本物理学会2024 年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shin-ei Fujii, Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Dynamics of causal hydrodynamic fluctuations in an expanding system
3. 学会等名 Quark Matter 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	藤井 宏次 (Hirotsugu Fujii) (10313173)	東京大学・大学院総合文化研究科・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	村瀬 功一 (Koichi Murase) (00834095)	上智大学・理工学部・研究員 (32621)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関