

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301
研究種目：挑戦的研究（開拓）
研究期間：2019～2022
課題番号：19H05496・20K20425
研究課題名（和文）熱伝導下における一次転移：新しい現象の同定と熱力学の拡張

研究課題名（英文）heat

研究代表者

佐々 真一（Sasa, Shin-ichi）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：30235238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000円

研究成果の概要（和文）：熱伝導下相共存の熱力学的性質に関して、水および液晶を用いた実験、レナード＝ジョーンズポテンシャル相互作用する分子動力学のシミュレーション、大域熱力学、ゆらぎの理論を用いて調べた。熱流によって過冷却気体が安定に存在することを予言する熱力学の体系は大きく進展した。ゆらぎの理論にもとづく大域熱力学の予言の理解もかなり深まってきた。そして、その現象が観測されるためには、あるクロスオーバーサイズ以上の系の大きさが必要であることが分かり、分子動力学で観測されるのは将来の課題である。また、実験で精密に観測するための理想的な設定を準備するのは簡単にはできないことも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

普遍的に準安定状態を熱流で安定化することができれば、新しい物性の開拓につながり、工学的な応用も期待される。そのような質的に新しい現象について定量的に調べることにより、その実現可能性について明らかにしてきた意義は大きい。まず、その現象が確かに存在すること、また、それを定量的に記述する理論が大変綺麗な構造をもっていたことは学術的に意義深い。さらには、新しい熱力学体系とミクロな世界の間をつなぐ確立するという非平衡統計力学の新しい課題を提供しつつ部分的に解決しているのも重要である。そして、分子動力学や実験で実現することの難しさを明らかにしたことは、引き続き行われるであろう研究で参照されることになる。

研究成果の概要（英文）：The thermodynamic properties of phase coexistence in heat conduction systems are investigated by experiments using water and liquid crystals, numerical simulations of molecular dynamics of the Leonard-Jones interaction potential, global thermodynamics, and the theory of fluctuations. A thermodynamic framework that predicts the stable existence of supercooled gases by heat flow has made great progress. Our understanding of global thermodynamic predictions based on the theory of fluctuations has also deepened considerably. It is found that a system size larger than a certain crossover size is necessary to observe the phenomenon, and this is a future subject of observation in molecular dynamics simulations. Furthermore, it has been clear that it is not easy to prepare ideal settings for precise observations in experiments.

研究分野：統計物理および非線形動力学

キーワード：熱力学 一次転移 相共存 非平衡

1. 研究開始当初の背景

非平衡状態の巨視的な記述は、局所熱力学にもとづく連続場のダイナミクスにもとづくことが多い。これは、分子スケールと連続場の変化スケールが十分に離れているときに妥当な考えである。しかしながら、気液共存状態のように界面がある場合、このスケール分離の仮定が成り立たない。このことから、連続場のダイナミクスにもとづく記述は自明に正しいわけではない。例えば、もっとも簡単な例として、熱伝導下の気液共存状態を考える。このときの界面の温度を問題にする。もし、この温度が平衡の気液共存温度と等しいなら、実現する局所的な熱力学状態は平衡状態と同じであるが、等しくない場合、平衡状態では熱力学的に安定ではない状態が熱流によって安定化することになる。これまでの研究では、実験によって界面温度を測定した論文はみつからない。分子動力学の数値シミュレーションでは、界面温度が平衡気液共存温度と等しいとする報告はあるが、系の大きさは非常に小さく流体モードがみえる状態ではない。理論的な記述では、界面温度と平衡気液共存温度が等しくなるような仮定を設定しているのが標準的であり、その仮定そのものを議論することはなされていない。この状況において、非平衡熱力学の一つの拡張形式として、大域熱力学が提案された。(Nakagawa, Sasa, PRL, 2017) これは、空間的に不均一な非平衡状態に対して、大域温度などの大域量を定義することで、自由エネルギー最小原理を非平衡に拡張する試みである。理論的には、導入された大域温度をつかっただ変分原理としてほぼ一意的に決定されるという単純な構造をもっている。そして、この大域熱力学による予言が、熱流による準安定状態の安定化である。

2. 研究の目的

大域熱力学の予言を柱にして、水および液晶を用いた実験、分子動力学の数値シミュレーション、理論の立場から熱伝導下相共存状態の性質を明らかにすることを目的にした。具体的に、まず実験では、熱伝導下で常な相共存状態を安定に実現することを目指す。これまでの気液共存状態の実験では、動的で複雑な現象を対象とするのが標準的だった。このような荒々しい状態は工学的問題で不可避的にあらわれるので、その現象論的整理を目指すことが目標になっていた。それに対し、本研究では、むしろ、静かな定常状態を実現し、完全に制御された状態に対して、精密な測定量を得ることを目的とする。分子動力学の数値シミュレーションでも、同様に熱伝導下気液共存状態を安定に実現し、熱力学量を測定することが目的になる。理論的には、大域熱力学の枠組みを深化させるとともに、マイクロな記述との関係を探る。

3. 研究の方法

(1) 水および液晶の実験

圧力の絶対値の測定誤差を避けるため、平衡相共存と熱伝導下相共存のふたつの系を用意し、差圧を測定することで、熱伝導下相共存の熱力学測定を可能にする実験装置を設定した。図1を参照。また、これと並行して、液晶をもちいて、熱伝導下におけるネマティック・等方相共存を観測する実験装置を設定した。図2を参照。これらの系について熱力学量を測定した。

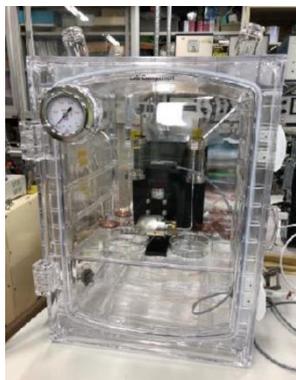


図1 熱伝導下気液共存系の設定

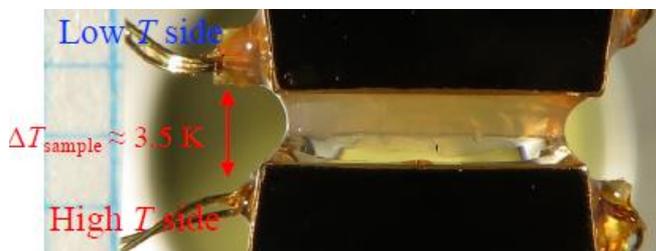


図2 : ネマティック・等方相共存の熱流下での観測例

(2) 分子動力学の数値シミュレーション

カットオフのあるレナード=ジョーンズポテンシャルで相互作用する50000粒子の系を用いて、安定した熱伝導下相共存を実現するために、圧力およびエンタルピー一定の相共存系を設

定した。図3を参照。この系に対して熱力学量を測定した。

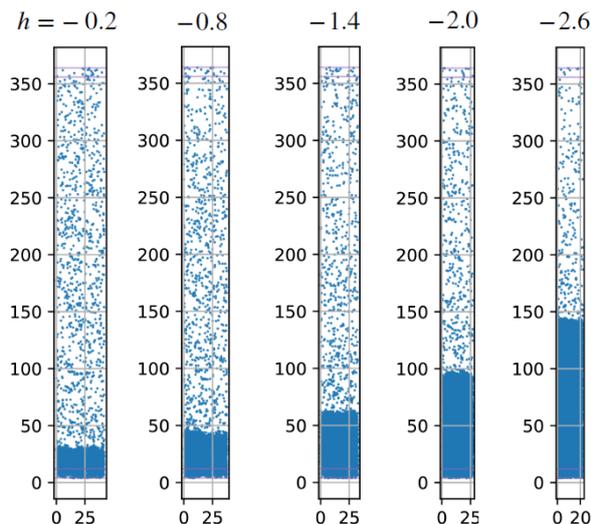


図3：エンタルピー密度を変えたときの粒子の配置図の変化。熱は流れているが、全エンタルピーおよび圧力は時間変化で一定に保たれている。

(3) 大域熱力学

状態方程式としてファンデルワールス方程式を仮定して定式化されていたが、状態方程式の詳細な形が分からなくても、一次転移点での熱力学量のデータベースを使って、界面温度を計算できる定式化を行なった。定圧条件下の定式化を定積条件下や断熱条件下など様々な条件下に対応する熱力学関係式を検討した。特に、断熱定圧環境下の場合、変分原理の要請と熱力学関係式の要請から変分関数および熱力学関数を求めた。さらに、気液転移にとどまらず、秩序・無秩序転移など他の一次転移にも適用できるように拡張した。いずれの形式においても、実験で測定される関係式について予言を与えることで一貫している。

(4) ゆらぎの理論

大域熱力学は新しい現象論であり、熱力学の枠組みを自然に拡張して測定量間の新しい関係を予言している。そこで議論された変分原理は、ゆらぎの理論と結びついているはずである。平衡系の場合には、熱力学の変分原理は平衡統計力学における分布と強く関係しているし、実際に平衡統計力学にもとづいて変分原理を導出できる。熱伝導下相共存系においても、ゆらぎの記述にもとづいて大域熱力学で得られた結果を導出することを試みた。具体的には、熱伝導下秩序無秩序転移を例題にして、オーダーパラメータ場とエネルギー場の確率的時間発展を議論した。非平衡度について線形応答領域に限定するので、このモデルの定常状態はZubarev-McLennan分布で記述される。平衡分布からの補正が平衡状態への緩和過程におけるエントロピー生成率の時間積分でかけるのでそれを評価すれば、変分関数が求まる。

4. 研究成果

(1) 水および液晶の実験

完全に制御された実験系を構築することが難しいことが分かった。輻射の影響も残っており、真空槽だけでは断熱環境を実現することはできない。また、気体液体の温度分布と側壁の温度分布の違いも影響を及ぼしているが、側壁の影響を切り離すことはできない。熱力学では、断熱条件をかなり大らかに使っても問題にはならないが、本研究課題のように厳密な定量性が問題となる現象については、理論が主張する断熱条件を厳密に満たさなければならない。この認識は、実際に実験を行うことによってはじめて理解できた。液晶系の場合には、実験設定における容器の問題を避けることに成功しているが、温度制御などがまだ十分にできているわけではない。ネマティック液晶の配向がそろそろ向きによって熱伝導率が異なるなど、液晶固有の問題があるので、この系が理想的な実験系になりえるかどうかはさらに検討が必要である。

(2) 分子動力学の数値シミュレーション

MAP 推定によって界面位置と幅を決め、局所量を測定した。その結果、界面温度は平衡気液共存

温度と一致した。その他の熱力学量についても、その結果から演繹される関係式と矛盾ないことが分かった。つまり、50000粒子の系では、大域熱力学の予言は検証されなかった。ところで、最近の秩序無秩序転移を示す統計力学モデルの数値計算によると、界面温度と平衡共存温度のずれを観測するにはある一定以上のサイズが必要であることが分かっている。つまり、このクロスオーバーサイズ以下では、界面温度は平衡気液共存温度と一致すると考えられる。この事実と合わせると、問題となるクロスオーバーサイズが50000粒子以上であることを示している。このクロスオーバーサイズを現在の系の様々な量から決めることが次の問題になる。例えば、界面ゆらぎの運動から決まる時定数はそのヒントを与えると期待される。

(3) 大域熱力学

熱伝導下気液相共存状態において、熱力学量を決める様々な公式を導出した。もっとも重要なのは界面温度の公式である。例えば、熱伝導下気液相共存における界面温度の平衡相共存温度からのずれは、

$$\theta = T_c(p^{\text{ex}}) - \frac{\zeta(1-\zeta)}{2} \left[|J|L_x \left(\frac{1}{\kappa_c^G} - \frac{1}{\kappa_c^L} \right) + |\Xi|\bar{\phi}(\rho_c^L - \rho_c^G) \right] + O(\varepsilon^2)$$

で与えられた。(Nakagawa, Sasa, JSP, 2019) ζ は規格化された界面の位置、 J は熱流、 Ξ は全体の温度差、 κ は熱伝導率、 ϕ は非体積、 ρ は密度をあらわす。 G, L の添え字は気体と液体を、 c の添え字は平衡共存状態を参照している。 ε は無次元化された非平衡度で線形応答領域における公式を示している。つまり、一般に、過冷却気体が熱流によって安定に存在していることを示している。具体的に1気圧の水を左側の9.5℃の熱浴と右側の10.5℃の熱浴で挟むと、左に液体、右に気体ができる。上記の公式によると界面温度は9.6℃であり、9.8℃の水蒸気が熱伝導系では安定に存在することになる。平衡条件下では、9.8℃の水蒸気は準安定であり、存在できたとしても一時的であり、一気圧9.8℃ではやがて液体になる。このような不安定な状態を熱流によって安定化することを定量的に予言できるようになったのは本研究の成果である。この公式は、様々な環境でも成り立つことが分かった。理論的には、それぞれの環境で導出した熱力学関係式がルジャンドル変換の構造で結ばれていることと関係している。(Nakagawa, Sasa, PRR, 2022) さらに、秩序無秩序転移が一次転移を示す場合の熱伝導下相共存についても公式を導き、上記公式の[]内の第2項がない形を得た。(Kobayashi, Nakagawa, Sasa, PRL, 2023)

(4) ゆらぎの理論

界面ダイナミクスが極端に遅くなる寄与を無視しうる状況では、界面温度は平衡気液共存温度と一致している。そこで、界面の運動が遅くなる時の寄与を計算する必要がある。熱流を一定に保つ境界条件では、直接計算するのが困難であり、エントロピー生成の評価に現象論的考察を持ち込むことで計算した。(Sasa, Nakagawa, et al, PRE 2021) そこで、大域熱力学の形式で保存系の場合の自然な非平衡変数は温度差であることが明らかになったことを受けて、ゆらぎの理論の定式化もその境界条件で行った。そのもっとも簡単な場合として、粒子密度だけが熱力学変数で粒子流の存在が非平衡条件になる場合を解析した。この場合、界面の運動がもっとも遅いという条件下でZubarev-McLennan分布を明示的に計算できる。そして、この結果は、大域熱力学による結果と完全に一致している。この内容は投稿論文としてほぼ完成しており、間もなく投稿される予定である。なお、熱流下秩序無秩序転移については、ゆらぎの理論よりもさらに微視的な統計力学モデル(ハミルトニアン=ポッツモデル)を用いて数値計算を行った。その結果、そのモデルでの界面温度は大域熱力学の予言と完全に一致する結果を得た。(Kobayashi, Nakagawa, Sasa, PRL, 2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Lefevere Raphael, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 188 |
| 2. 論文標題 Macroscopic Stability of Time Evolution of Gibbs Measures | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics | 6. 最初と最後の頁 1~20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-022-02943-1 | 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 Kobayashi Ikumi, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 128 |
| 2. 論文標題 Characterizing the Asymmetry in Hardness between Synthesis and Destruction of Heteropolymers | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 247801 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.247801 | 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 Nakagawa Naoko, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Unique extension of the maximum entropy principle to phase coexistence in heat conduction | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 33155 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.4.033155 | 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 Dechant Andreas, Sasa Shin-ichi, Ito Sosuke | 4. 巻 106 |
| 2. 論文標題 Geometric decomposition of entropy production into excess, housekeeping, and coupling parts | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 24125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.024125 | 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 Sasa Shin-ichi, Hiura Ken, Nakagawa Naoko, Yoshida Akira | 4. 巻 189 |
| 2. 論文標題 Quasi-static Decomposition and the Gibbs Factorial in Small Thermodynamic Systems | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics | 6. 最初と最後の頁 31 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-022-02991-7 | 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 Hiraizumi Mao, Ohta Hiroki, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 189 |
| 2. 論文標題 Phase Growth with Heat Diffusion in a Stochastic Lattice Model | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics | 6. 最初と最後の頁 1~21 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-022-02990-8 | 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 Haga Taiki, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 Interscale entanglement production in a quantum system simulating classical chaos | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment | 6. 最初と最後の頁 123102~123102 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/aca2a1 | 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 Yoshida Akira, Nakagawa Naoko | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Work relation for determining the mixing free energy of small-scale mixtures | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 23119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023119 | 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 Minoguchi Mutsumi, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 130 |
| 2. 論文標題 Divergent Stiffness of One-Dimensional Growing Interfaces | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 197101 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.197101 | 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 吉田旭、中川尚子 | 4. 巻 78 |
| 2. 論文標題 微小溶液の混合自由エネルギーを決定する仕事関係式 -- ジャルジンスキー等式・錬金術的操作・分子の識別可能性 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 日本物理学会誌 | 6. 最初と最後の頁 140 ~ 148 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Dechant Andreas, Sasa Shin-ichi, Ito Sosuke | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Geometric decomposition of entropy production in out-of-equilibrium systems | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 L012034 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L012034 | 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 Dechant Andreas, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Improving Thermodynamic Bounds Using Correlations | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review X | 6. 最初と最後の頁 41061 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.041061 | 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 Dechant Andreas, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Continuous time reversal and equality in the thermodynamic uncertainty relation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 L042012 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.L042012 | 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 Hiraizumi Mao, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 2021 |
| 2. 論文標題 Perturbative solution of a propagating interface in the phase field model | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment | 6. 最初と最後の頁 103203 ~ 103203 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ac22fc | 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 Tanogami Tomohiro, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Van der Waals cascade in supercritical turbulence near a critical point | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 L032027 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.L032027 | 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 Hiura Ken, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Kinetic uncertainty relation on first-passage time for accumulated current | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 L050103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.L050103 | 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 Shin-ichi Sasa, Naoko Nakagawa, Masato Itami, Yohei Nakayama | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Stochastic order parameter dynamics for phase coexistence in heat conduction | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 62129 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.062129 | 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 Tanogami Tomohiro, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 XY model for cascade transfer | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 L022015 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L022015 | 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 Yoshida Akira, Nakagawa Naoko | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Work relation for determining the mixing free energy of small-scale mixtures | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Research | 6. 最初と最後の頁 23119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023119 | 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 Itami Masato, Nakayama Yohei, Nakagawa Naoko, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Effective Langevin equations leading to large deviation function of time-averaged velocity for a nonequilibrium Rayleigh piston | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 22125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.022125 | 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 Hiroyoshi Nakano, Yuki Minami, and Shin-ichi Sasa | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Long-Range Phase Order in Two Dimensions under Shear Flow | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 160604 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.160604 | 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 Itami Masato, Nakayama Yohei, Nakagawa Naoko, Sasa Shin-ichi | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Effective Langevin equations leading to large deviation function of time-averaged velocity for a nonequilibrium Rayleigh piston | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 '022125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.103.022125 | 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 Naoko Nakagawa, Shin-ichi Sasa | 4. 巻 177 |
| 2. 論文標題 Global Thermodynamics for Heat Conduction Systems | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics | 6. 最初と最後の頁 825-888 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-019-02393-2 | 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 Yuki Minami, Shin-Ichi Sasa | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Thermodynamic entropy as a Noether invariant in a Langevin equation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment | 6. 最初と最後の頁 13213 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab5b8b | 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 Hiroyoshi Nakano, Shin-ichi Sasa | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Equilibrium measurement method of slip length based on fluctuating hydrodynamics | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review E | 6. 最初と最後の頁 33109 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.033109 | 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 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Fluctuation-response inequality out of equilibrium | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences | 6. 最初と最後の頁 6430-6436 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1918386117 | 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73件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 伊丹将人, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ランジュバン方程式の粗視化 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 横田和磨, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 気液相転移における不純物効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 ゆらく系から創発するカオス |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 角祐太郎, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 エントロピー駆動界面の定常速度を与える機構 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 小林郁海, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 効率的な並列組み立て可能性の特徴づけ |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 層流と気液界面を共存させる条件 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉田旭, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 重力と熱流がもたらす非自明な相配置と必然的な準安定状態 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 養口睦美, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 KPZ方程式における揺動応答関係とその応用 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 柳澤優介, 日浦健, 川口喬吾, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 生体分子モーターの非熱的なゆらぎによる速度上昇の理論モデル |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子 |
| 2. 発表標題 大域熱力学と熱伝導下相共存 |
| 3. 学会等名 新潟大学物理教室コロキウム(新潟大学)(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoko Nakagawa |
| 2. 発表標題 Global thermodynamics for heat conduction systems |
| 3. 学会等名 Japan-France joint seminar "Physics of dense and active disordered materials" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉田旭, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 重力と熱流がもたらす非自明な相配置と必然的な準安定状態II |
| 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 横田和磨, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 分子動力学でみるせん断流下気液相共存 |
| 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 柳澤優介, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 確率的反応拡散系の相共存状態 |
| 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 箕口睦美, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 線形応答にみるKS方程式とKPZ方程式の対応関係 |
| 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 小林郁海, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 並列組み立て効率の相転移 |
| 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 松本健心, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 確率的化学反応系におけるゆらぎと情報の流れ |
| 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 Andreas Dechant, Jerome Garnier-Brun, Shin-ichi Sasa |
| 2. 発表標題 Speed limits for ergodicity |
| 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 中川尚子 |
| 2. 発表標題 混ぜる自由エネルギーと分ける自由エネルギー |
| 3. 学会等名 第10回統計物理学懇談会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shin-ichi Sasa |
| 2. 発表標題 Non-equilibrium thermodynamics from information theory |
| 3. 学会等名 SECOND WORKSHOP ON STOCHASTIC THERMODYNAMICS (WOST II) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 格子気体非平衡相共存におけるゆらぎのポテンシャル |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年 秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 日浦健, 伊藤創祐, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 逐次予測的な情報熱力学第二法則と大数の法則 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 格子気体非平衡相共存についての大域熱力学 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 田之上智宏, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 乱流カスケードのミニマルモデル |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加村優悟, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 レナード=ジョーンズ粒子系の気液界面付近における熱伝導率変化 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 吉田旭, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 錬金術法による操作仕事を用いた活量係数の表式 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa, Sosuke Ito |
| 2. 発表標題 Geometric decomposition of entropy production in out-of-equilibrium systems |
| 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 小林郁海, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 複雑な分子の組み立ての困難さと破壊の簡単さ |
| 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 佐々真一, 日浦健, 中川尚子, 吉田旭 |
| 2. 発表標題 準静的分割の構成とギブスのパラドックス |
| 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 平泉真生, 太田洋輝, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 準安定相からの安定相の確率的相成長 |
| 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 伊丹将人, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 数値的時間粗視化による確率的運動方程式の推定 |
| 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 養口睦美, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 KPZ界面の外力応答における輸送係数の異常性 |
| 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 久田淳司, 賀川史敬, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 熱流下気液相共存系に関する局所温度・気相圧力計測の実験 |
| 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 吉田旭, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 混合自由エネルギーによる二成分流体気液転移の有限サイズ効果の特徴付け |
| 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 加村優悟, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 熱流による気液界面の安定化と界面近傍状態の再現の難しさ |
| 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 中川尚子 |
| 2. 発表標題 Global thermodynamics for heat conduction states |
| 3. 学会等名 中央大学・素粒子 理論研究室セミナー（オンライン）（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中川尚子 |
| 2. 発表標題 Global thermodynamics for heat conduction states : 非平衡状態を粗っぽく見る枠組みの提案 |
| 3. 学会等名 ISSPワークショップ 開放系トポロジーと生体・量子・統計物理, 東京大学 柏キャンパス物性研究所（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 ゆらぐ相境界ダイナミクスに対する熱流効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ポワズイユ流下での気液界面温度特異性を決める無次元パラメータ |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 湯川諭, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 Lennard-Jones熱伝導系における気液転移 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 伊丹將人, 宮崎州正, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 平衡流体における面平均カレントの長距離相関と超均一性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中野裕義, 南佑樹, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 一様せん断流下にある二次元系での連続対称性の破れと長距離秩序 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa |
| 2. 発表標題 Continuous time reversal and equality in the thermodynamic uncertainty relation |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 非相加的エントロピーで体系化される大域熱力学 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小林未知数, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ハミルトン・ポッツ模型を用いた一次相転移界面を含む熱伝導状態の解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 ゆらぐ相境界ダイナミクスに対する熱流効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ポワズイユ流下での気液界面温度特異性を決める無次元パラメータ |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 湯川諭, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 Lennard-Jones熱伝導系における気液転移 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 伊丹將人, 宮崎州正, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 平衡流体における面平均カレントの長距離相関と超均一性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 日浦健, 金澤輝代士 |
| 2. 発表標題 熱力学第2法則は平衡分布を決めるか? |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Andreas Dechant, Shin-ichi Sasa |
| 2. 発表標題 Continuous time reversal and equality in the thermodynamic uncertainty relation |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 非相加的エントロピーで体系化される大域熱力学 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小林未知数, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ハミルトン・ポッツ模型を用いた一次相転移界面を含む熱伝導状態の解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中野裕義, 南佑樹, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 一様せん断流下にある二次元系での連続対称性の破れと長距離秩序 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々真一 |
| 2. 発表標題 「エントロピー最大原理の非平衡への拡張 - ミクロ力学からの構成と実験への予言 -」 |
| 3. 学会等名 基研研究会 「熱場の量子論とその応用」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々真一 |
| 2. 発表標題 「ネーター不変量としてのエントロピー：古典、量子、確率過程」 |
| 3. 学会等名 量子と古典の物理と幾何 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 芳賀大樹, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 古典カオスを再現する離散量子系におけるエンタングルメント・エントロピー生成とコルモゴロフ・シナイエントロピー |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 日浦健, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 アルゴリズム的ランダムな初期状態のマクロな緩和 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 熱伝導による過冷却状態の安定化: データベース値を用いた予想 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 熱伝導下相共存の物理的機構 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊丹将人, 中山洋平, 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 断熱ピストン問題における長時間変位のキュムラント母関数 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中野裕義, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ゆらぐ流体力学に基づいたスリップ長の平衡測定法の提案とその応用 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 吉田旭, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 熱伝導下にある二成分流体への半透膜の挿入 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 舘享祐, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 密度不均一を課した熱伝導系の非平衡定常状態 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 瀬谷敦雅, 伊丹將人, 中山洋平, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 方向性ブラウン運動の変位の三次キュムラントを再現する有効ランジュバン方程式 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------|
| 1. 発表者名 中川尚子, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 流れがある系の大域熱力学 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々真一, 中川尚子, 田崎晴明 |
| 2. 発表標題 簡単な確率過程模型による非平衡相共存 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 南佑樹, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 確率過程におけるネーター不変量としての熱力学エントロピー |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------|
| 1. 発表者名 伊丹將人, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 時間平均によるマルコフ過程の粗視化 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中野裕義, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 ゆらぐ流体力学に基づいたスリップ長の平衡測定法：凹凸を持つ壁への応用 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 西村和真, 有賀隆行, 伊丹將人, 佐々真一 |
| 2. 発表標題 確率過程模型によるキネシンの特徴付け |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 吉田旭, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 熱伝導下にある二成分流体への半透膜の挿入II |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 高野晃太郎, 中川尚子 |
| 2. 発表標題 非平衡エントロピーを用いた蔵本モデルの特徴づけ |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020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 | 湯川 諭 (Yukawa Satoshi) (20292899) | 大阪大学・大学院理学研究科・准教授 (14401) | |

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 | 齋藤 一弥 (Saito Kazuya) (30195979) | 筑波大学・数理物質系・教授 (12102) | |
| 研究分担者 | 中川 尚子 (Nakagawa Naoko) (60311586) | 茨城大学・理工学研究科（理学野）・教授 (12101) | |

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 |
|---------|---------|
| | |