

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03647

研究課題名（和文）熱力学関数の操作的拡張にもとづく非平衡構造形成の記述

研究課題名（英文）Operational extension of thermodynamic functions for non-equilibrium structure formation

研究代表者

中川 尚子（Naoko, Nakagawa）

茨城大学・理工学研究科（理学野）・教授

研究者番号：60311586

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：熱流の影響を受けるマクロ系を記述する新しい枠組みとして「大域熱力学」を考案し、熱伝導状態に熱力学構造を拡張した。この枠組みに則った変分原理により「熱流が気液界面付近に過冷却気体を安定化する」という新現象を報告、同時に、エントロピーには熱伝導系の非相加性を表す追加項が加わることを導いた。複数の環境設定について大域熱力学の変分原理を設定し、エントロピー最大や自由エネルギー最小の状態が同じ非平衡定常状態となる熱力学等価性を確認した。また、二成分流体の混合自由エネルギーを数値実験で決定する新しい公式を導出した。アルゴン=クリプトン混合物に適用し、観測される気液転移の様子が特徴づけられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱力学や統計力学は物性研究の根幹をなし、特に変分原理は平衡での構造予測を可能にする有用性の高い理論である。これらを非平衡状態に拡張する研究は100年以上にわたる歴史がある。大域熱力学は熱伝導系の全体量だけを用いる簡便な記述法だが、非自明な現象予測をもたらすことができ、数値実験による実証例も報告された（PRL, 2023）。大域熱力学が予言する「熱流による準安定状態の制御」はこれまで検討されなかった制御技術と物性開発の新しい可能性を示唆する。また、混合自由エネルギーを数値実験で決定するための新公式は、微小サイズ溶液の潜在能力を数値実験で定量化する新しい方法論を与える。

研究成果の概要（英文）：We developed "global thermodynamics" as a new framework for describing macroscopic systems exposed to heat flow, and succeeded in extending the thermodynamic structure to the heat conduction state. By using the variational principle in accordance with this framework, we proposed a new phenomenon that "heat flow stabilizes a supercooled gas near the gas-liquid interface". We derived that the entropy in heat conduction systems involves an additional term that leads to nonadditivity. We set up the variational principle of global thermodynamics for multiple environmental settings and confirmed that the states of maximum entropy and minimum free energy are the same nonequilibrium steady state. In addition, we derived a formula for determining the mixing free energies of binary fluids in numerical simulations. The formula reproduced the characteristics of the liquid-gas transition observed in the argon-krypton mixture.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：非平衡統計力学

キーワード：大域熱力学 非平衡エントロピー 準安定状態 熱流 混合自由エネルギー Jarzynski等式

1. 研究開始当初の背景

揺らぎの定理発見を契機とし、20年間で非平衡統計力学は大きく発展した。その主な対象は生体高分子で、多くの研究者が生物物理を念頭に置いた研究を進め、Jarzynski 等式や Hatano-Sasa 等式、情報熱力学の枠組みなど生命現象への新しいアプローチを提示している。生体高分子を操る実験技術の向上により、非平衡統計力学の諸関係式の検証実験も行われている。

一方、平衡から遠いマクロ系については、Prigogine らの活躍により化学系・生物系への動機が1970年代に高まり、散逸構造やリズム形成についての現象論的研究が行われた。理論主導で蓄積された成果のもと、現在では、生体発生や生物の模様形成について生物学者がチューリングパターンを研究するようになり、神経回路網や心臓拍動など生体維持機構が引き込みや決定論的ダイナミクスの視点から研究されている。また、非平衡統計力学の発展に伴い、散逸構造やリズム形成の問題に揺らぎの視点を取り込む試みが始まっている。

揺らぎやダイナミクスを中心に据えた研究が進む一方で、エントロピーや自由エネルギーのような熱力学量の非平衡拡張は進んでいない。平衡熱力学と統計力学の成功は誰の目にも明らかであり、その方法論を非平衡研究に移植できれば現象の普遍性や予言可能性も含んだこれまでにない強力な体系を作り上げることができる。散逸構造発生の有無を区別する状態量や状態量間のマクロな関係性を記述する枠組みがあれば強力な応用性を持つに違いない。研究代表者たちが提案した非平衡エントロピー (PRL 2008) は、実際に熱伝導系の数値実験で計測され、非平衡エントロピーと伝統的な局所平衡エントロピーの間のつながりを確認することができた (PRE 2016)。一方、揺らぎの定理を利用しない新しい視点として、系全体に渡る局所量の積分(大域的な量)だけを用いて、平衡熱力学形式を単成分熱伝導系に移植をした(申請当時準備中論文)。この熱力学形式から、熱伝導下気液共存では流体力学とは相反する状態(過冷却や過加熱)が安定化する予想を得た (PRL 2017)。

2. 研究の目的

本研究計画では上述のような研究トレンドを踏まえ、10年先に応用領域開拓の基盤となり得る新しい記述の枠組みを追求する。揺らぎや散逸を中心に据えた方法論から、エントロピーや自由エネルギーのような熱力学量を非平衡研究の主役に据える方法論へと進化をはかる。局所平衡熱力学に則ると、平衡熱力学の範疇を越えた数多の非平衡現象を理解できる。実際、熱伝導方程式やナビエ=ストークス方程式の成功例は枚挙にいとまがない。しかしながら、必ずしもすべての局所的情報を知る必要がある問題ばかりではない。例えばソーレ効果を利用して同位体分離を行う場合には、与えた温度差でどの程度の分離収率となるかのみに関心があり、細やかな流体の動きや濃度分布の全情報は必要ない。系の局所の詳細にこだわらず、大域的な測定(例えば圧力測定など)だけで関心の情報にアクセスできる方が簡便でかつ応用範囲も広がるに違いない。背景の項に記載した例に見るように、非平衡系に大域的な熱力学形式を適用すると、局所的視点の枠を出る新しい捉え方や気づかれていなかった現象を提示できる。様々な非平衡系に同様の試みをする方法論を提示するために、局所熱力学と対比した「大域熱力学」を整備・追求して、より多くの状況に対応できる普遍的枠組みへと発展させたい。

3. 研究の方法

(1) 熱伝導下单成分流体を記述する大域熱力学の構築

単成分流体は熱力学や統計力学の非平衡拡張に適したそもそもの複雑さが少ない対象である。この系を熱伝導下に置いたときにエントロピーや自由エネルギー、その他の諸熱力学量がどのように拡張されるか、非平衡性を表す新しい熱力学量を特定することが可能かなどについて理論的に研究を行い、単成分流体の大域熱力学の完成を目指す。同時に単成分流体の標準形として一成分の Lennard-Jones 粒子系の分子動力学計算を実施し、気液転移に伴う異常性の探索を行う。

(2) 二成分流体の混合と分離を特徴付ける熱力学量の検討

大域熱力学を単成分流体以外の対象に拡張するために、二成分流体を対象として研究を行う。単成分流体と同様の熱力学的性質はもちろんのこと、二成分混合に関する新たな性質が現れる。例えば熱伝導下に置くと、平衡で最大エントロピーの状態である混合状態から自律的な二成分分離(ソーレ効果)が起きる。半透膜分離による浸透圧発生も多成分であるがゆえに起きる現象である。単成分流体の大域熱力学を参照しながら二成分流体の大域熱力学的記述を行う。特に混合エントロピーは単成分流体にはない物理量なので、この量を具体的に計測する手段を開発することが非平衡拡張を展開するために重要である。理論と数値実験の両面からこの課題に取り組む。

(3) 蔵本モデルの引き込み転移における過剰熱発生

(1)(2)に示した研究方法では、系の境界で駆動する(熱流をかける)非平衡状態を扱っており、局所熱力学(流体記述)が現象の大半を説明可能な場合に相当する。一方、化学反応系やアクティブマターなどそもそも局所平衡を前提とできない非平衡現象は多い。このような

非平衡系でも過剰熱測定により非平衡エントロピーを具体的に検討することは可能であり、数値実験でこの量を研究するノウハウも蓄積できている。そこで動的素子集団の標準模型である蔵本モデルを例に取り、過剰熱を測定して非平衡エントロピーを導入可能かどうかを検討する。

4. 研究成果

(1) 熱伝導下单成分流体を記述する大域熱力学の構築

単成分流体熱伝導系の空間非一様な非平衡定常状態を特徴づける唯一の温度として、大域温度を提案し、大域温度、および局所熱力学量の空間積分から自然に定義される大域熱力学諸量を採用して、平衡系の熱力学構造が熱伝導状態に拡張できることを示した。また、この熱力学的枠組みに則った新しい変分原理を提案し、熱伝導下では、気液界面付近で過冷却気体が安定化するという具体的現象の予言を行った。これらの詳細を Global Thermodynamics for Heat Conduction States として統計力学の専門誌である Journal of Statistical Physics 誌に出版した。高度に専門的な掲載誌であるにも関わらず、現在までに 33,000ビューという高いアクセス値となっており、専門家からの関心の高さが示されている。

次に、系の両端で流入出する熱流を完全に等量に制御することにより熱伝導下エネルギー保存系を設定し、エントロピー最大原理と熱力学基本関係式を満足させるエントロピー関数を理論的に探索した。気液共存状態について、エントロピーの役割を担う関数として非相加的な関数を同定し、また定積や定圧などの環境変化のもとでの非平衡定常状態の熱力学的等価性やルジャンドル変換を示し、大域熱力学をより強固な体系とした。これらの結果は Physical Review Research 誌に掲載された。

二次元 Lennard-Jones 粒子系の分子動力学計算により熱伝導下気液共存系の界面付近の様子を観察した。平衡状態では系の空間対称性や熱力学状態の一様性から気液配置や界面位置が安定しない。しかし、熱流印加を行うと定常状態が大きく変化し、気液配置が一意に定まり界面位置が安定する様子が観測された。温度プロファイルと密度プロファイルから、気液界面の気体側数粒子分の領域に熱伝導率が優位に小さくなる領域があること、界面位置の安定の有無により気液共存状態での圧力値が大きく変わる観測結果を得た。結果は日本物理学会にて発表した。

(2) 二成分流体の混合と分離を特徴付ける熱力学量の検討

二成分流体の熱伝導状態を記述するため、大域温度や大域化学ポテンシャルを定義し、大域熱力学を考案した。大域熱力学に則った変分原理を適用し、半透膜で仕切られた二成分流体に生じる浸透圧を決定する公式を導出した。熱流によって浸透圧値にズレが生じること、その値は局所熱力学予想と異なることを確認した。予想結果を検証するために、分子動力学計算を用いて異なる分子サイズの二成分系で浸透圧の実測実験を開始した。理論式を検証するには化学ポテンシャルのプロファイル推定、有限サイズ効果や緩和の見極めなどが必要のため、検証作業は容易ではない。現段階では、実験値は理論値と一致しておらず、今後の発展的研究が必要である。これらの結果は物理学会で報告した。

この検証実験を通して、二成分流体の標準エントロピーや混合エントロピーを決定する数値実験プロトコルの作成が必要になった。数値実験では実装可能な混合物創出過程として錬金術的操作を導入し、Jarzynski 等式やフィードバック操作の考え方を応用して、簡便に混合自由エネルギーを計測する方法を作成した。アルゴン=クリプトン混合物に混合自由エネルギー決定公式を適用し、わずか 500 粒子でも混合自由エネルギーに気液転移の特徴が表れることを数値実験で証明した。この公式を作成する過程で、統計力学で要請される $N!$ 因子を数値実験の熱力学測定から実測することにも成功した。これらの成果は Physical Review Research 誌に掲載され、科学新聞および JST による英語/中国語での研究紹介サイトにも掲載された。

統計力学の古典的問題である $N!$ 因子の表出を数値的に検証できたため、この因子を熱や仕事として理論的に定式化できるはずである。そこで、混合自由エネルギー公式の決定過程を詳細に見直し、 $N!$ 因子を操作的仕事として定式化することに成功した。この成果は Journal of Statistical Physics 誌に掲載された。

(3) 蔵本モデルの引き込み転移における過剰熱発生

局所平衡の記述を許さない非平衡系も大域的な熱力学構造が有するか検討するために、無限範囲相互作用をする非線形振動子系(蔵本モデル)の数値実験研究を行った。非線形振動子系をランジュバン熱浴と接触させ、平衡系の平均場 XY スピンから徐々に蔵本モデルに変更する操作プロトコルを設計した。この操作に伴い系から熱浴に流れる熱流を計測し、拡張クラウジウス関係式を適用して非線形振動子系のエントロピー計測を行った。蔵本モデルの性質が顕になるには非平衡度の二次までの影響を取り込む必要があるため、二次まで正しい非平衡エントロピーの決定を目指して、熱と操作仕事のゆらぎの相関も測定した。過去においてこの量の測定を行った例は報告されておらず、測定の方法論から検討を行ったところ、非平衡転移点が近づくにつれ揺らぎが発散していく傾向が認められた。揺らぎの発散により計測量の収束性や誤差に検討課題は残るが、数値的結果をもとにしたエントロピーとそこから定

義される比熱により、平均場 XY スピンの秩序=無秩序転移と蔵本モデルの引き込み転移の比較を行った。転移点に近づくにつれ比熱が発散する傾向は、平衡・非平衡を問わずにほぼ同じ特性を持つとの結果を得た。この結果は日本物理学会で報告した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

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 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 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 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 -- ジェルジンスキー等式・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 140-145
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 Sasa Shin-ichi, Nakagawa Naoko, Itami Masato, Nakayama Yohei	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 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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Seya Atsumasa, Aoyagi Tatsuya, Itami Masato, Nakayama Yohei, Nakagawa Naoko	4. 巻 2020
2. 論文標題 Multiplicative Langevin equation to reproduce long-time properties of nonequilibrium Brownian motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 013201 ~ 013201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab54bc	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32件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

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
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
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 ²
3. 学会等名 日本物理学会
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 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 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 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 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 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 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 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 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 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 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 吉田旭, 中川尚子
2. 発表標題 多成分系を大域的に記述する熱力学関数の決定
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 高野晃太郎, 中川尚子
2. 発表標題 蔵本モデルでの非平衡エントロピー測定とその精度問題
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 吉田旭, 中川尚子
2. 発表標題 熱伝導下にある二成分流体を大域的に記述する熱力学の構築
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 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 館享祐, 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 伊丹將人, 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 高野晃太郎, 中川尚子
2. 発表標題 同期状態の非平衡エントロピーの測定
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 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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------