

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：25503

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14616

研究課題名（和文）量子多体系におけるカシミール効果の研究

研究課題名（英文）Investigation on Casimir effects in quantum many body systems

研究代表者

吉井 涼輔 (Yoshii, Ryosuke)

山陽小野田市立山口東京理科大学・共通教育センター・講師

研究者番号：30632517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では量子多体系における真空の構造に由来したカシミール力への影響とまたその利用方法の提案という目的に基づき、多体系における真空構造の解析、カシミール効果に対する相転移の影響、パラメータが変調する際に取り出すことが可能な熱力学的な仕事の解析、ノイズのある場合に対する量子多体相関のある場合のノイズのない場合の真空状態からのズレの推定方法など、関連する話題を多岐にわたって調べた。結果として、磁場の印加された系における非一様な凝縮体の安定性、磁場による相転移によるカシミール力の特異的振る舞い、パラメータの周期変調による仕事の発生、スピン1ボソン系の真空状態の不安定性などを明らかにしてきた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では真空の揺らぎから生じる力(カシミール力)に関連する統括的な研究を行った。この力は至る所で現れるため、微小な素子や生体膜における影響から、高エネルギー物理学における余剰次元のコンパクト化の起源の可能性なども調べられている。本研究ではカシミール効果における量子多体効果の影響とそれをを用いた制御、そして応用方法の提案など、今後の発展へとつながる研究を行ってきた。研究期間を通して論文12報と招待セミナー5件、国際会議発表(口頭発表5件、ポスター発表8件)など様々な媒体を通して成果を報告してきた。この研究がさらに深まることにより、実際の応用や自然現象のより深い理解へと繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, based on the objective of investigating the influence of Casimir forces originating from the structure of vacuum in quantum many-body systems and proposing methods for their utilization, various topics were explored. These include analysis of vacuum structure in many-body systems, effects of phase transitions on Casimir effects, analysis of thermodynamic work extractable during parameter modulation, and methods for estimating deviations from vacuum states with and without quantum many-body correlations in the presence of noise. As a result, insights into the stability of non-uniform condensates in systems subjected to magnetic fields, peculiar behavior of Casimir forces due to phase transitions induced by magnetic fields, generation of work due to periodic modulation of parameters, and instability of vacuum states in spin-1 bosonic systems have been revealed.

研究分野：凝縮系物理学・量子情報物理学

キーワード：カシミール効果 真空の構造 量子多体効果 相転移

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

真空の揺らぎにより、物体間にCasimir力と呼ばれる力が生じることが知られているが、最初の研究で考えられていた電磁場だけでなく、あらゆる場の揺らぎからCasimir力が生じることが指摘され、様々な研究が行われていた。また、微小加工技術の発展とともに量子力学的な効果が無視できない領域に到達し始めていた。特に電氣的に中性な物質の場合 $\sim 1\mu\text{m}$ よりも小さい場合には最も支配的な力となる。実際、工学的分野では、微小振動素子の振動数のCasimir力の影響による変化が検出されていた。

Casimir力は真空の揺らぎによって生じるため、あらゆる階層の物理理論でその影響が現れるため、宇宙論における宇宙項問題、力の階層性の問題の自然な説明に対する試み、素粒子物理学における余剰次元の有限サイズでの安定化、生物学における二重膜構造の形成や化学における分子間力などに対する影響の重要性が指摘されていた。しかし、研究開始当初はCasimir力に関連した研究は相互作用のない場に関する研究が主なものであった。

通常Casimir力は真空エネルギー(物質中では基底エネルギー)のゆらぎが境界間の距離に依存することから生じるため、ゆらぎに寄与する、『次元性・ゼロモード(エネルギー0での励起)の有無』などが大きく影響を与えることも知られていた。例えば、ゼロモードの存在しない状況ではCasimir力が距離によって指数関数的に減少することが知られていた。また、『境界の形状・系自体のトポロジー』も影響を与えることが知られており、例えば、電磁場の量子ゆらぎに起因したCasimir力を考えると、平行な金属板間には引力が働くが金属球殻には球殻を膨張させる方向、つまり斥力が働く。さらに、Casimir力はゆらぎの元となる背景の場にも依存し、例えば、金属板間に誘電体を挟むと、Casimir力の大きさが変わることも知られている。

2. 研究の目的

上述のように、Casimir力の研究では主に相互作用のない場に関する研究がなされていたが、物質場などは相互作用が生じていることが多々あり、また逆に相互作用によってCasimir力が影響を受けるならば、それを介してCasimir力を制御できる可能性も拓かれる。これを踏まえて本研究では形状効果(境界条件、次元など)と背景場の性質という2つの軸に加えて、場の相互作用による影響という3つ目の軸を加え、Casimir力の統括的理解に至ることを目的としている。また、相互作用によるCasimir力の制御方法の理解についても目的としている。

さらに、Casimir力は真空の影響を強く反映することから、Casimir力を詳細に調べることによって背景場の情報を得ることが可能であると期待される。例えば背景場が相転移を生じた場合、Casimir力にその影響が現れると考えられる。その場合、Casimir力を測定することによって、相転移現象を間接的に“観る”ことが出来ると期待される。また、相互作用を制御パラメータとして系統的な理解に至ることにより、工学的応用の可能性も開かれる。

3. 研究の方法

本研究では、解析計算と数値計算を併用し、様々なセットアップにおいてCasimir力の解析やその周辺の現象に関する研究を行った。また、Casimir力の計算に先立って、磁場を印加した系での真空状態の解析や非一様な凝縮体の生じる可能性について調べ、その状態の安定性に対する解析も行った。さらに、Casimir力の応用を見据えて、境界条件が時間的に変わる場合に生じる仕事についての解析を行った。

4. 研究成果

[4-1] 相互作用ボゾン系における非一様解と Casimir 力

相互作用フェルミ系において、Dirichlet 境界条件を持つ有限系を考えた場合、非一様な解が現れることと、相互作用を変化させた場合に Casimir 力が引力から斥力で転移することを先行研究で明らかにしていたが、本研究では相互作用ボゾン系においても同様な現象が生じ得るかどうかを調べた。系としては CP(N-1) モデルを用いた。このモデルでは平均場近似での取り扱いが容易であり、また先行研究のフェルミ系で用いた Gross-Neveu モデルとの双対性があることも知られている。しかし、その一方、このモデルでは 1 次元において相転移が生じないことも知られている。本研究では 1 次元系を扱うため、Casimir 力の転移が起こるかどうかは非常に非自明な問題であった。

具体的な方法として、このモデルに対して、非一様な解とその安定性を調べる方法として GL 展開の方法を適用した(図 1) [PRD2019]。また、Casimir 力を計算し、引力と斥力との間の転移の有無も確認した[JHEP2019]。ここでは双対性を用いて、フェルミ系の解析手法を適用する方法を用いた。結果として、この場合には Casimir 力に転移が生じないことが明らかになった(図 2,3)。

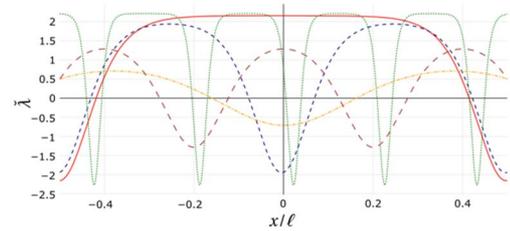


図 1. GL 展開により得られた CP(N-1) モデルの非一様解

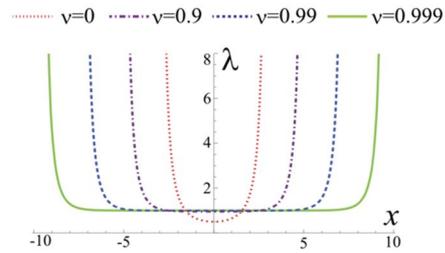


図 2. Dirichlet 境界条件を持つ有限系での CP(N-1) モデルの非一様解

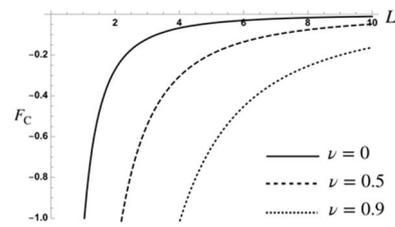


図 3. Dirichlet 境界条件を持つ有限系での CP(N-1) モデルのカシミール力

[4-2] 相転移と Casimir 力

[4-1]の研究結果とフェルミ系での結果から相転移の生じるモデルでは Casimir 力に特異な振る舞いが生じることが示唆される。そこに着目し、相転移を Casimir 力の測定から検出する方法についての提案を行った。具体的には磁場の印加された超伝導モデルを考えた。この場合、節を持つ超伝導状態が安定となるがその節の数が変わる点において Casimir 力も大きく変化することを明らかにした。当該研究については現在論文執筆中である。

[4-3] 2次元における非一様な解とその安定性

これまでの Casimir 力の研究は 1 次元系での解析を行ってきた。しかし、[4-2]で指摘したように 1 次元系の特殊性により相転移が起きない状況になっており、そのため Casimir 力の転移が生じていない可能性がある。一方、高次元では強結合領域において解析計算・数値計算ともに実行が困難である。これを回避するために、本研究では AdS/CFT の方法を用いた計算を行った。まず、計算スキームのチェックとして AdS/CFT の方法で 1 次元系に対して実際に非一様な解を構成した[JHEP2020]。さらに、複素秩序変数の場合への拡張も行い、具体的な解の構成を行った[PRD2021]。

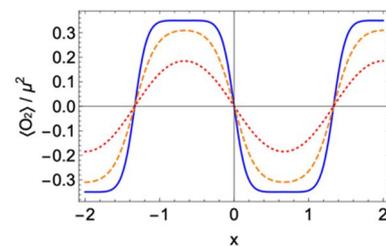


図 4. AdS/CFT 対応によって構成された非一様解

これらの研究では holographic 超伝導のモデルで計算を行っており、現象論による部分があるため、より第一原理的に得られる手法が望ましいことから、D3/D7 モデルを用いて 2 次元系での非一様解の構成を行った。結果として、磁場を印加した系でキックを持つ凝

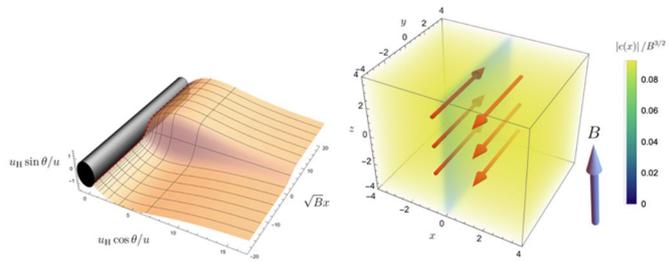


図 5. AdS/CFT 対応によって構成された 2 次元系における非一様

縮体を記述する解が得られ、Ginzburg-Landau 展開によって予言される結果と整合的な解が得られた[JHEP2024]。また、この解ではキック付近でキックに沿った方向の電流が生じていることがわかり、その向きがキックの左右で逆となっている(図 5)。

[4-4] 光学格子系における真空状態の解析

本研究は当初の Casimir 力の解析の過程で派生的に生じたテーマであり、経緯としては[4-1]の研究において相互作用ボソン系で Casimir 力の転移が生じなかったことを受けて、CP(N-1)モデル以外での解析を行うことを目的としていた。しかし、実際に解析を進める内にボソン系に内部自由度がある場合、そもそも真空状態の安定性の議論がこれまでになされていないことが分かった。それを受けて、スピン 1 ボース系における真空状態の解析を行い、これまでに生じると考えられていた polar 状態がスピン流に対して不安定性を示すことを明らかにした[PRA2021]。

[4-5] 周期変調のある系における仕事

本研究も当初の Casimir 力の応用から派生した研究テーマである。元々は相互作用を変化させることによって Casimir 力を変化させ、それによって境界を振動させ仕事を取り出すことを目的としていたが、周期変調したパラメータの元での仕事というテーマ自体が非平衡量子力学の分野でまだ詳しく調べられていない状況であることが明らかとなった。それを踏まえて、周期変調しているパラメータがある状況での非平衡量子熱力学

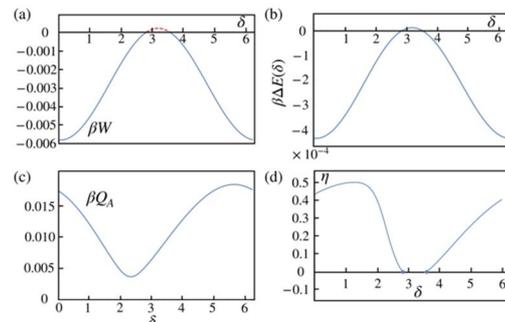


図 5. 周期変調のある系での仕事・エントロピー生成・吸熱・効率

の構成を目指し、仕事・熱・効率などの非平衡系への拡張を行い、量子ドット系で具体的な解析を行った[PRR2023]。さらに派生したテーマとして、現在はパラメータ空間に固有値の縮退する例外点が生じる場合に対して解析を行っており、論文執筆中である。今後はこの結果を Casimir 力と組み合わせ、Casimir-tronics の実現に向けた提案を行っていく。

[4-6] ノイズのある場合の基底状態からのズレの効率的な検出方法

量子多体系における基底状態は実際の系では熱やその他のノイズで理想的な状態からズレる。このズレを調べる方法を調べる過程で量子計算に用いられるリソース状態のフィデリティを効率的に評価する方法を考案した。この結果は従来の評価方法に比べて多項式回の実験で実現可能であるため、フィデリティ評価の非常に効率的な手法となっている [PRA2022, PRR2023]。

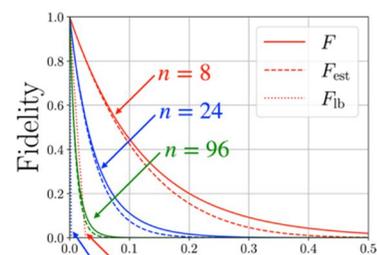


図 6. リソース状態のフィデリティとその推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 S. Yamashika, D. Kagamihara, R. Yoshii, and S. Tsuchiya	4. 巻 5.043102
2. 論文標題 Evolution of entanglement entropy in strongly correlated bosons in an optical lattice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.043102	査読の有無 無
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 R. Yoshii and H. Hayakawa	4. 巻 5.033014
2. 論文標題 Demon driven by geometrical phase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.033014	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 D. Kagamihara, R. Kaneko, S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, S. Tsuchiya, and I. Danshita	4. 巻 107
2. 論文標題 Renyi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033305-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.033305	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 K. Akimoto, S. Tsuchiya, R. Yoshii, and Y. Takeuchi	4. 巻 106
2. 論文標題 Passive verification protocol for thermal graph states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.012405	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 R. Yoshii, S. Yamashika, and S. Tsuchiya	4. 巻 91
2. 論文標題 Entanglement propagation in thermalization of an isolated quantum system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054601-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.054601	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 S. Yamashika, S. Tsuchiya, and R. Yoshii	4. 巻 110
2. 論文標題 Stability of supercurrents in a superfluid phase of spin-1 bosons in an optical lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.043305	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 M. Matsumoto and R. Yoshii	4. 巻 104
2. 論文標題 Twisted kink crystal in holographic superconductor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 66007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.066007	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 H. Hayakawa, P. Ville, and R. Yoshii	4. 巻 2112
2. 論文標題 Geometrical Quantum Chemical Engine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 12370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2112.12370	査読の有無 無
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 Matsumoto Masataka, Nakamura Shin, Yoshii Ryosuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Kink crystalline condensate and multi-kink solution in holographic superconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2020)022	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 Yamashika Shion, Yoshii Ryosuke, Tsuchiya Shunji	4. 巻 103
2. 論文標題 Stability of supercurrents in a superfluid phase of spin-1 bosons in an optical lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	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) 10.1103/PhysRevA.103.043305	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 R. Yoshii and M. Nitta	4. 巻 11
2. 論文標題 "Nambu-Jona Lasinio and Nonlinear Sigma Models in Condensed Matter Systems", invited review in Special Issue "Nambu-Jona-Lasinio model and its applications"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 636 (1-29)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym11050636	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 A. Flachi, G. Fucci, M. Nitta, S. Takada, R. Yoshii	4. 巻 100
2. 論文標題 Ground state modulations in the CP(N-1) model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 085006 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.085006	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 A. Flachi, M. Nitta, S. Takada, R. Yoshii	4. 巻 798
2. 論文標題 Casimir Force for CP(N-1) Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letter B	6. 最初と最後の頁 134999 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.134999	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 S. Ishigaki, M. Matsumoto, and R. Yoshii	4. 巻 5.274
2. 論文標題 A domain wall and chiral edge currents in holographic chiral phase transitions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2024)274	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 T. Tanizawa, Y. Takeuchi, S. Yamashika, R. Yoshii, and S. Tsuchiya	4. 巻 5,043260
2. 論文標題 Fidelity-estimation method for graph states with depolarizing noise	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.043260	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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 T. Sakamoto, R. Yoshii, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Violation of the Leggett-Garg inequality for a Bose condensate in a double-well potential
3. 学会等名 The 27th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Yamashika, D. Kagamihara, R. Yoshii and S. Tsuchiya
2 . 発表標題 Entanglement dynamics of bosons trapped in a 1D optical lattice
3 . 学会等名 The 27th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Yoshii and H. Hayakawa
2 . 発表標題 Demon driven by geometrical phase
3 . 学会等名 heoretical studies of non-equilibrium driven-dissipative systems (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Yoshii
2 . 発表標題 Entanglement propagation in thermalization of an isolated quantum system
3 . 学会等名 Quantum Information Entropy in Physics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, D. Kagamihara, and S. Tsuchiya
2 . 発表標題 Entanglement dynamics of bosons in an optical lattice
3 . 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Akimoto, S. Tsuchiya, R. Yoshii, and Y. Takeuchi
2. 発表標題 Deterministic verification method for thermal graph states
3. 学会等名 YITP International Workshop "Quantum Information Entropy in Physics" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, D. Kagamihara, and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement dynamics of bosons in an optical lattice
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本匡貴, 吉井涼輔
2. 発表標題 ホログラフィック超伝導におけるcomplex kink解とtwisted kink crystal解
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本匡貴, 中村真, 吉井涼輔
2. 発表標題 ホログラフィック超伝導におけるキンククリスタル解とマルチキンク解
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 吉井涼輔
2. 発表標題 量子多体系における非一様相とCasimir効果, 2019年4月18日
3. 学会等名 東京工業大学 量子物理学・ナノサイエンスセミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yoshii
2. 発表標題 Inhomogeneous solutions and Casimir effect for CP(N-1) model
3. 学会等名 CPN model: recent developments and future directions (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Yoshii
2. 発表標題 Casimir effect in interacting system
3. 学会等名 2nd International Conference on Symmetry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yoshii and S. Tsuchiya
2. 発表標題 Entanglement transport and thermalization in an isolated many-body system
3. 学会等名 Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Yoshii
2. 発表標題 Demon driven by geometric phase
3. 学会等名 StatPhys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 24.D. Kagamihara, R. Kaneko, S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, S. Tsuchiya, I. Danshita
2. 発表標題 Quench dynamics of Renyi entanglement entropy of free bosons starting from insulating states
3. 学会等名 StatPhys28 (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

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