

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01900

研究課題名（和文）数値計算の符号問題の解決に向けた基本アルゴリズムの開発と物理学の諸問題への適用

研究課題名（英文）Development of the fundamental algorithms towards solving the sign problem and its application to various physical systems

研究代表者

福間 将文（Fukuma, Masafumi）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10252529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：符号問題の解決に向け、「焼き戻しレフシェッツ・シンプル法」（福間・梅田）を改良した「世界体積ハイブリッドモンテカルロ（HMC）法」（福間・松本）を提唱した。これは、その汎用性と結果の信頼性から最も有望な解決法の一つとみなされている。我々はこの手法を格子場理論に適用し、線形逆問題において反復法を積極的に活用することで、局所場理論の計算コストを大幅に削減することに成功した。さらに、配位空間が群多様体である場合まで世界体積HMC法を拡張し、格子ゲージ理論への適用の準備を整えた。一方で、「群のランダムサンプリング」を用いた格子ゲージ理論用の新しいテンソルネットワーク法を提案し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

符号問題のために進展が停滞している分野は物理学に限っても数多くあるため、符号問題の汎用的解決方法の確立によって惹き起こされる学術的波及効果は大きい。本研究課題で提案した「世界体積ハイブリッドモンテカルロ法」は、汎用性と結果の信頼性に優れており、符号問題の解決に向けた重要な一歩であると考えている。今後は、時間依存する量子多体系や非平衡統計力学に本研究結果を適用していきたい。これにより、時間変化する系についても本格的な数値計算が可能となり、全く新しい学問的潮流が生まれることを期待している。

研究成果の概要（英文）：Towards solving the sign problem, we proposed the "Worldvolume Hybrid Monte Carlo (HMC) method" (Fukuma and Matsumoto) as an improved version of the "tempered Lefschetz-Thimble method" (Fukuma and Umeda). This is considered to be one of the most promising solutions due to its versatility and the reliability of the results. We applied it to various lattice field theories, and by actively utilizing iterative methods for linear inverse problems, we succeeded in significantly reducing the computational cost for local field theories. Furthermore, we have extended the Worldvolume HMC method to the case where the configuration space is a group manifold, completing the preparation for applying the method to lattice gauge theory. We have also proposed a new tensor network method for lattice gauge theory by using the "random sampling of a group manifold", and demonstrated its effectiveness.

研究分野：数値計算物理学

キーワード：符号問題 有限密度QCD 格子ゲージ理論 レフシェッツ・シンプル 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法 ハバード模型 テンソルネットワーク法 テンソルくりこみ群

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

大型ハドロン衝突型加速器(LHC)の実験結果により、素粒子の標準模型がストリング・スケール( $10^{17}$  GeV)近くの高エネルギーまで場の量子論として破綻しないことが確認された。しかしながら、実際に宇宙の時間発展や中性子星内部の状態方程式などを定量的に理解することは、厳密な計算方法がないため未だに難しい。強い相互作用の第一原理計算としては格子ゲージ理論に基づくモンテカルロ(MC)計算があるが、有限密度の系では振動積分を数値的に評価することが必要となる。そのため、誤差を相対的に減らすためには「自由度の指数関数」という膨大な計算時間がかかってしまい、現実的な有限時間では精度の良い計算結果が得られない。こうした数値計算上の困難を**符号問題**と呼ぶが、この問題のために定量的計算ができない例としては、上で挙げた有限密度格子ゲージ理論の他にも多数あり、例えばハバード模型などの強相関電子系や量子多体系の実時間ダイナミクスが典型的なものとして知られている。

上述の符号問題に対してはこれまで様々なアルゴリズムが提案され、どれも一長一短があったが、2017年に我々(福間・梅田[1])は、鞍点法の拡張である「レフシェッツ・シンプル法」に対し、経路積分領域を複素空間内に変形する際の変形パラメーターで焼き戻し(テンパリング)することで符号問題とエルゴード問題(異なるシンプル間で配位が遷移しにくくなる問題)が同時に解決できることを示した。これにより、相対誤差を小さくするための計算時間が「自由度の指数関数」から「自由度のべき乗程度」に減らせることが期待され、符号問題が一気に解決できる可能性が出てきた。実際、我々のこのアルゴリズム「**焼き戻しレフシェッツ・シンプル法**」(TLT法: tempered Lefschetz thimble 法)は汎用性がかかなり高いことが確認されており、計算コストの削減に向けた改良が順調に進めば、様々な系に対して本格的に利用されていく可能性がある。

[1] M. Fukuma and N. Umeda, “Parallel tempering algorithm for integration over Lefschetz thimbles,” Progress of Theoretical and Experimental Physics 2017, 073B01 (2017) (査読有、arXiv:1703.00861 [hep-lat]).

## 2. 研究の目的

「焼き戻しレフシェッツ・シンプル法」をさらに改良して計算コストを削減し、新しい手法を物理学の諸問題に適用することで、これまで符号問題のために進展が停滞している分野を一気に活性化する。

## 3. 研究の方法

まず、符号問題が顕著に現れることが知られている3つの典型例：①有限密度 QCD、②強相関電子系、③量子多体系の実時間ダイナミクス、に対象を絞ってアルゴリズムの高効率化を行い、その後、類似した問題へ適用していく。同時に、他にも符号問題が解決することで大きな進展が見込めそうな系を積極的に探し、必要に応じてアルゴリズムを新たに開発していく。こうして適用対象を拡大しながら、符号問題の解決に向けた大きな学術の流れを作っていく。

## 4. 研究成果

### ■世界体積ハイブリッドモンテカルロ(HMC)法の提唱

「焼き戻し Lefschetz シンプル法」(TLT法: 福間・梅田 2017[1])の改良版として「**世界体積ハイブリッドモンテカルロ法**」を提唱した(世界体積 HMC 法: 福間・松本 2020[2])。これは、複素空間内に変形した積分面を連続的に重ね合わせた領域(世界体積)上で分子動力学を行うもので、数値計算アルゴリズムとしては全く新しい手法である(図1参照)。従来の TLT 法と比較する

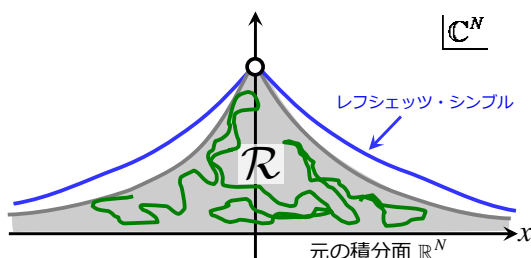


図 1. 世界体積  $\mathcal{R}$  上の分子動力学。

と、符号問題とエルゴード性の問題を引き続き同時解決しながら、計算コストが圧倒的に低いという特長を持つ。

この手法の有効性を確認するため、有限密度 QCD のトイ模型であるカイラル行列模型 (Stephanov 模型) に適用し、厳密解と一致することを示した (図 2 参照) [2]。この行列模型は有限密度 QCD の符号問題の解決を目指すアルゴリズムにとって極めて重要なベンチマークとなっていて、実際、行列サイズ無限大の極限で有限密度 QCD の定性的振る舞いを記述することに加え、複素ランジュバン法など、他の手法では物理量を正しく計算できないことが知られている。我々の世界体積 HMC 法は、Stephanov 模型で正しい結果を与えた初めての (そして現時点で唯一の) アルゴリズムである。こうした研究結果の積み上げにより、汎用性と結果の信頼性の点で世界体積 HMC 法は符号問題に対する有望な解決法の一つとみなされるようになってきている。

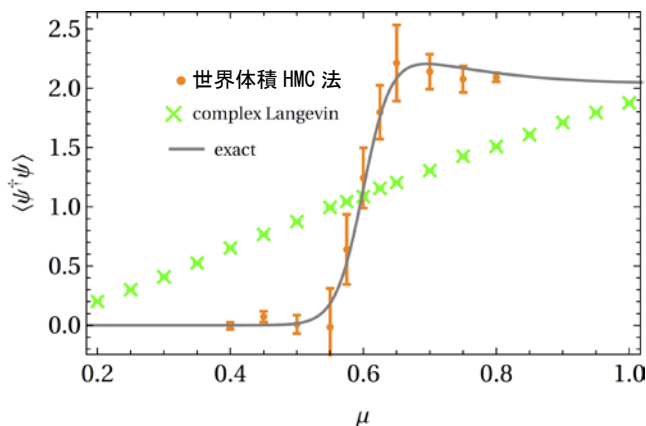


図 2. Stephanov 模型での数密度[2]。  
世界体積 HMC 法が厳密解と一致する結果を与えるのに対し、複素ランジュバン法は間違った収束を示している。

次に、この手法を格子場理論に本格適用する研究を進めた。具体的には、局所場理論では Hessian 行列が疎行列になることを用いて、線形逆問題に対する反復法を積極的に活用したアルゴリズムを進展させた [3]。そして、有限密度複素スカラー理論の場合には、大サイズ格子における計算コストスケールが自由度の 1 乗となることを示した [4]。さらに、群多様体を配位空間とする理論に対する世界体積 HMC 法を確立し、格子ゲージ理論に適用するための準備を整えた (M. Fukuma, 論文準備中)。

同時に、世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のフェルミオン系への適用を開始した [4]。とくに、有限密度 QCD とよく似た構造を持つハバード模型を対象として選び、格子サイズが小さい場合の既存結果との一致を示すことで、我々の手法の有効性を示した。さらに計算コストスケールを調べ、それが補助変数 (Hubbard-Stratonovich 変数) のとり方によって大きく変わることを確認した。

なお、上記の一連の研究は、本研究課題の後継に位置する基盤研究 (A) 「世界体積ハイブリッドモンテカルロ法による QCD の相構造と実時間ダイナミクス の 解 明」 (代 表 : 福 間 将 文) に 引 き 継 が れ、 現 在 さ ら な る 研 究 が 進 行 中 で あ る。

[2] M. Fukuma and N. Matsumoto, “Worldvolume approach to the tempered Lefschetz thimble method,” Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021, 623B08 (2021) (査読有、arXiv:2012.08468 [hep-lat]).

[3] M. Fukuma, “Simplified algorithm for the Worldvolume HMC and the Generalized thimble HMC,” Progress of Theoretical and Experimental Physics 2024, 053B02 (2024) (査読有、arXiv:2311.10663 [hep-lat]).

[4] M. Fukuma and Y. Namekawa, “Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to the finite-density complex  $\phi^4$  model and the Hubbard model,” PoS LATTICE2023, 178 (2024) (査読有).

## ■ 格子ゲージ理論の新しいテンソルネットワーク表示の提唱

「テンソルネットワーク法」はそもそもモンテカルロ計算を行わないため、符号問題を避ける数値計算法として注目されている。この手法は様々な点でモンテカルロ法と対照的であり、実際、長距離相関関数の計算が苦手といった短所がある一方で、①分配関数が計算できる、②グラスマン数が直接扱える、というモンテカルロ法にはない長所が存在する。これまで格子ゲージ理論への適用の試みはあったが、それらは基本的に指標 (character) 展開に基づいており、力学変数の有限化も群の高次表現を落とすことで実現していた。しかしながらこの手法では高ランクのゲージ群や 3 次元以上の時空の扱いが難しく、そのために、格子ゲージ理論に対するテンソルネットワーク法の適用はあまり進んでいなかった。

そこで我々は新たに、力学変数の有限化として「群から有限個の元をランダムに選び、各

plaquette からの Boltzmann 重率への寄与をそのまま 4 階テンソルとみなす」という「**ランダムサンプリング法**」を提唱した(図 3 参照) [5]。そして、実際に 2 次元の場合に Levin-Nave 型のテンソルくりこみ群を用いて物理量を計算し、正しく解析解と一致する結果が得られることを確認した(図 4 参照)。なお、この手法は指標展開を一切用いないため高次元化も容易である。モンテカルロ計算との相補的な役割を期待して、現在も研究が進行中である。

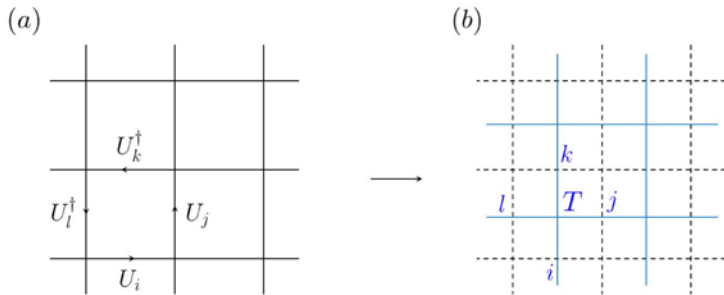


図 3. (a) Plaquette からの  
(b) テンソル  $T_{ijkl}$  の構成[6]。

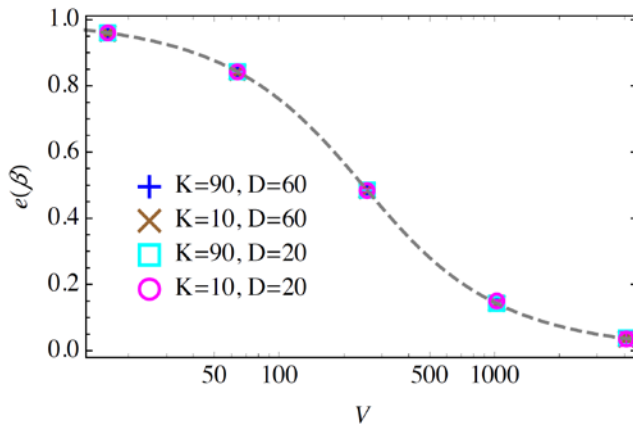


図 4. 2 次元  $SU(2)$  格子ゲージ理論でのエネルギー密度  $e(\beta)$  の計算結果[6]。  
 $K$  はランダムに選んだ群の元の数、 $D$  は計算の最中に残す自由度の大きさ。  
 $\beta$  は格子ゲージ理論の作用の係数で体積  $V$  に対し  $\beta=0.01V$  にとった。

[5] M. Fukuma, D Kadoh and N. Matsumoto, "Tensor network approach to two-dimensional Yang-Mills theories," Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021, 123B03 (2021) (査読有、arXiv:2107.14149 [hep-lat]).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Yusuke Namekawa, Masafumi Fukuma	4. 巻 453
2. 論文標題 Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to the finite-density complex $\Lambda^4$ model and the Hubbard model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 PoS(LATTICE2023)	6. 最初と最後の頁 178 (1~13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.453.0178	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 Masafumi Fukuma	4. 巻 2024
2. 論文標題 Simplified Algorithm for the Worldvolume HMC and the Generalized Thimble HMC	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053B02 (1~23)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptae051	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 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto, Yusuke Namekawa	4. 巻 430
2. 論文標題 Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to lattice field theories	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PoS(LATTICE2022)	6. 最初と最後の頁 011 (1~9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.430.0011	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 該当する
1. 著者名 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto, Yusuke Namekawa	4. 巻 406
2. 論文標題 Numerical sign problem and the tempered Lefschetz thimble method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PoS(CORFU2021)	6. 最初と最後の頁 254 (1~15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.406.0254	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 該当する

1. 著者名 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 2207
2. 論文標題 Tempered Lefschetz thimble method as a solution to the numerical sign problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012054 (1~6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012054	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 該当する

1. 著者名 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 396
2. 論文標題 The basics and applications of the tempered Lefschetz thimble method for the numerical sign problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 POS(LATTICE2021)	6. 最初と最後の頁 395 (1~9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.396.0395	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 該当する

1. 著者名 Nobuyuki Matsumoto, Masafumi Fukuma, Yusuke Namekawa	4. 巻 396
2. 論文標題 Worldvolume tempered Lefschetz thimble method and its error estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 POS(LATTICE2021)	6. 最初と最後の頁 446 (1~9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.396.0446	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 該当する

1. 著者名 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto, Yusuke Namekawa	4. 巻 2021
2. 論文標題 Statistical analysis method for the worldvolume hybrid Monte Carlo algorithm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123B08-1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab133	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 Masafumi Fukuma, Daisuke Kadoh, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 2021
2. 論文標題 Tensor network approach to two-dimensional Yang-Mills theories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123B03-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab143	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 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 2021
2. 論文標題 Worldvolume approach to the tempered Lefschetz thimble method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023B08-1 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab010	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 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 363
2. 論文標題 Distance between configurations in MCMC simulations and the geometrical optimization of the tempering algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 168-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0168	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 Masafumi Fukuma, Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 376
2. 論文標題 Emergent quantum geometry from stochastic random matrices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 180-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.376.0180	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 福間 将文	4. 巻 78
2. 論文標題 符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法	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 583 ~ 592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.78.10_583	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 福間 将文	4. 巻 1月号
2. 論文標題 符号問題とレフシェッツ・シンプル法 ~ 鞍点法からの拡張 ~	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 14 ~ 19
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 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題におけるシンプルの方法
3. 学会等名 駒場研究会「場の理論への非摂動的アプローチ」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福間将文、徳竹温也
2. 発表標題 項のあるYang-Mills理論のテンソルくりこみ群などを用いた解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年年次大会
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 福間将文、滑川裕介
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の様々な格子模型への適用I
3. 学会等名 日本物理学会2024年年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福間将文、滑川裕介
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の様々な格子模型への適用II
3. 学会等名 日本物理学会2024年年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題の解決法としての世界体積ハイブリッドモンテカルロ法とその格子模型への適用
3. 学会等名 「富岳」成果創出加速プログラム 合同シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法
3. 学会等名 学習物理学の創生 領域会議（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文、滑川裕介
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のダイナミカルフェルミオン系への適用I
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文、滑川裕介
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のダイナミカルフェルミオン系への適用II
3. 学会等名 日本物理学会2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to dynamical fermion systems
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法
3. 学会等名 「富岳」成果創出加速プログラム キックオフミーティング (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Applying the Worldvolume HMC method to dynamical fermion systems
3. 学会等名 40th International Symposium on Lattice Field Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Sign problem and the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method
3. 学会等名 Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法 (企画講演)
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間将文、滑川裕介
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法による有限密度スカラー理論における符号問題の解消
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 福間将文、松本信行、滑川裕介
2. 発表標題 符号問題を持つ局所場理論への世界体積焼き戻しLefschetzシンプル法の適用
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 福間将文
2. 発表標題 世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の格子場理論への適用について
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Sign problem and the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method
3. 学会等名 NTU-Kyoto 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Sign problem and the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Applying the Worldvolume HMC method to lattice field theories
3. 学会等名 39th International Symposium on Lattice Field Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 The basics and applications of the tempered Lefschetz thimble method for the numerical sign problem
3. 学会等名 38th International Symposium on Lattice Field Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Tempered Lefschetz thimble method as a solution to the numerical sign problem
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Numerical sign problem and the tempered Lefschetz thimble method
3. 学会等名 Workshop on Quantum Geometry, Field Theory and Gravity (Corfu 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Numerical sign problem and the tempered Lefschetz thimble method
3. 学会等名 QCD phase diagram and lattice QCD (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本信行、滑川裕介、福間将文
2. 発表標題 世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法における誤差評価について
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会(素核宇)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福間将文、加堂大輔、松本信行
2. 発表標題 2次元Yang-Mills理論へのTRGの適用について
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会(素核宇)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本信行、滑川裕介、福間将文
2. 発表標題 世界体積焼き戻しレフシェッツ・シンプル法のハバード模型への適用と誤差評価について
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会(物性)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福間将文
2. 発表標題 符号問題の解決に向けた最近の進展について
3. 学会等名 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Fukuma
2. 発表標題 Sign problem and the tempered Lefschetz thimble method
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本信行, 福間将文, 梅田直弥
2. 発表標題 カイラル行列模型の符号問題への焼き戻しレフシェッツ・シンプル法の適用と 計算コストのスケーリングの評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(素核宇)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本信行, 福間将文, 梅田直弥
2. 発表標題 量子スピン系の符号問題への焼き戻しレフシェッツ・シンプル法の適用と計算コストのスケーリングの評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(物性)
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	菊川 芳夫  (Kikukawa Yoshio)  (20252421)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授   (12601)	
研究 分担者	金森 逸作  (Kanamori Issaku)  (60399805)	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・研究員   (82401)	

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		
米国	RIKEN BNL Research Center		