

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H03982

研究課題名(和文) 格子場の理論における時空対称性の実現

研究課題名(英文) Realization of spacetime symmetries in lattice field theory

研究代表者

鈴木 博 (Suzuki, Hiroshi)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：90250977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：格子ゲージ理論に代表される格子場の理論は、場の量子論の非摂動的な定式化と解析を可能にする手法であり、数学的に厳密な場の理論の構成と共に、コンピュータシミュレーションを用いた量子色力学(QCD)のダイナミクスの解明に大きな成果を収めてきた。格子場の理論はしかしながら時空の格子化に基づくため、並進回転や超対称性といった時空対称性との相性が悪く、この点が時空対称性に関連した物理の研究の妨げとなっている。当研究では、我々が近年開発したグラディエント・フローによる格子場理論でのエネルギー運動量テンソルの構成法を中心に、場の量子論の非摂動的レベルでの時空対称性の実現に関する様々な研究成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

場の量子論は素粒子に代表される原子以下の世界を記述する基本言語である。格子場の理論は、この場の量子論の非摂動的な定式化と解析を可能にする定式化で、素粒子物理学では、強い相互作用のダイナミクスの解明に大きな成果を収めてきた。しかしながら、格子場の理論が時間と空間の格子化を元に行っていることから、連続的な時間と空間に付随する並進や回転といった対称性が明白に表現できない。このことは、こうした対称性に付随した物理量の非摂動的解析に困難を与えている。当研究は、近年我々が明らかにした全く新しいアイデア(グラディエント・フローによる物理量の普遍的な構成)を中心に、この困難を乗り越えようとする研究である。

研究成果の概要(英文)：The lattice field theory, represented by lattice gauge theory in elementary particle physics, is a powerful framework which enables non-perturbative formulation and analyses of quantum field theory (QFT). It has provided great achievements in mathematically rigorous formulations of QFT and in investigations of the dynamics of quantum chromodynamics (QCD) on the basis of computer simulations. The lattice field theory, however, precisely because it is based on a discretization of spacetime, it is quite incompatible with spacetime symmetries such as the translation, rotation, and supersymmetry; this point prevents a straightforward studies of physics related to spacetime symmetries. In this research project, setting the construction of the energy-momentum tensor in the lattice field theory by the gradient flow, which we developed recent years, as a core idea, we have obtained various results on the realization of spacetime symmetry in QFT at the non-perturbative level.

研究分野：素粒子理論・場の量子論

キーワード：格子場の理論 グラディエント・フロー 非摂動論

## 1. 研究開始当初の背景

原子以下の素粒子の世界を記述する場の量子論の非摂動的な定式化としては、格子 QCD に代表される格子場の理論が最もよく理解されている。この定式化は数学的に厳密な構成論的場の理論と関連する一方、コンピュータシミュレーションを用いた非摂動的な計算手法により、量子色力学 (QCD) における非摂動的現象の研究において極めて大きな成功を収めてきた。この定式化はしかしながら時空間の格子化に基づくため、我々の連続的な時空間に付随した並進や回転といった時空対称性との相性が悪い。理論の並進対称性はエネルギー運動量テンソルという、エネルギーや運動量、角運動量やディラレーションといった基本的物理量の情報を運ぶ保存量の存在を意味するが、上記の事情から非摂動的場の量子論におけるエネルギー運動量テンソルの定義・構成は複雑な問題である。2013 年にゲージ場理論におけるこの問題に対してグラディエント・フローという手法が有効ではないかという理論的考察がなされ、その直後にフェルミオンを含まないゲージ理論における数値シミュレーションでの実証、またフェルミオンを含むゲージ理論への定式化の一般化がなされた。当研究課題はこの、グラディエント・フローに基づくエネルギー運動量テンソルの構成法 (現在は SFtX 法と呼ばれる) の萌芽期に提案された。

## 2. 研究の目的

当研究課題は上記のグラディエント・フローに基づくエネルギー運動量テンソルの構成法のアイデアを核に、格子場理論における時空対称性の実現とその応用を追求しようとしたものである。エネルギー運動量テンソルは場の理論における極めて基本的な物理量であり、その非摂動的構成はそれ自身が興味深い。同時に、エネルギー運動量テンソルは、場の理論の有限温度での状態方程式、粘性係数、共型場理論の物理、ハドロンのスピン構造といった問題で基本的役割を果たすため、こうした時空対称性と関連した問題の非摂動的な研究への応用も目的とした。また、素粒子物理学の文脈で多大の関心が持たれるいわゆる超対称性も代表的な時空対称性であり、まさにこの理由から格子場理論による超対称性理論の非摂動的解析は困難である。この超対称性にまつわる問題も研究の視野に置いた。

## 3. 研究の方法

研究は、定式化に関する純理論的なものと、それを応用した数値実験的なものに分かれる。いずれの研究も、グラディエント・フローによる格子場理論でのエネルギー運動量テンソルの構成法をまずは核に据え、その拡張や応用を少しずつ模索した。ここでは、当研究計画で雇用したポストドク研究員の方とも連携協力し研究を進めた。また数値シミュレーションには、KEK 大型シミュレーション研究 (IBM System Blue Gene Solution)、HPCI システム利用研究課題 (Oakforest-PACS, K, ITO)、筑波大学計算科学研究センター学際共同利用プロジェクト (COMA, Oakforest-PACS)、大阪大学サイバーメディアセンター (OCTOPUS)、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠 (ITO) などのスーパーコンピュータを利用させて頂いた。

## 4. 研究成果

1. グラディエント・フローのくりこみ可能性の証明。グラディエント・フローの大きな特徴は、その紫外有限性である。これは、通常の結合定数のくりこみを行うだけで、ゲージ場の複合演算子の相関関数が有限になる。この事実は、Luescher と Weisz により証明が与えられたが、その証明は必ずしも分かり易いものではない。ここでは、この重要な事実により平易な証明を与えた。
2. グラディエント・フローを用いた結合定数空間における Wilson 流くりこみ群の提案と検証。グラディエント・フローと Wilson 流くりこみ群フローとの類似性はかねてより指摘されており、これを用いたゲージ場理論におけるゲージ不変性を保った Wilson 流くりこみ群の実現が示唆される。ここでは、くりこまれた結合定数とは結局エネルギースケールに依存した物理量に他ならないという一般的な観点から、グラディエント・フローにより定義される 1 点相関関数のフロー時間に対する応答からくりこみ群フローを定義する試みを、非自明な固定点が存在する理論に対して行った。
3. グラディエント・フローを用いたエネルギー運動量テンソルの構成を用いた重力場中のカイラルアノマリーの計算。エネルギー運動量テンソルは重力場の源であり、この観点からの研究も興味深い。ここでは、グラディエント・フローを用いて構成されるフェルミオンのエ

エネルギー運動量テンソルとカイラル  $U(1)$  カレントを用いて、重力場中でのカイラル  $U(1)$  アノマリーの計算を行った。これらの複合演算子を含む三角形ダイアグラムは、予想通りアノマリーの構造と無矛盾な非局所的構造を持つことが確かめられた。一方、一般座標 Ward-高橋恒等式を満足する局所的な構造は自動的に満足されず、局所相殺項を必要とすることが見てとれた。

4. 超対称性を厳密に保つ定式化による 2 次元  $N=2$  Landau-Ginzburg 模型の数値シミュレーション。これはグラディエント・フローとは直接関係しないが、超対称性という時空対称性を明白に保つことができる格子場定式化として興味深い。2 次元の  $N=2$  Landau-Ginzburg 模型は、低エネルギー極限で非自明な共形場理論になると考えられており、ここではその最も簡単な場合について、予想されるスケール次元と中心電荷を数値シミュレーションによって検証する研究を行った。
5. 超対称カレントの SFtX 法による構成の定式化。超対称カレントは超対称性という時空対称性に付随した保存カレントであり、エネルギー運動量テンソルと同様、格子場理論での構成が極めて複雑な演算子である。ここでは再びグラディエント・フローをこの問題に適用し、4 次元の  $N=1$  超対称 Yang-Mills 理論および 4 次元の  $N=2$  超対称 Yang-Mills 理論における超対称カレントの構成を定式化した。格子ゲージ理論における超対称性理論の格子シミュレーションでは、本来、超対称カレントの保存則を再現するように格子パラメータのチューニングを行う必要がある。将来、上記の超対称性ゲージ理論の格子シミュレーションをこのように行う際には、我々の超対称カレントの構成が有用になると信じる。
6. クエンチ QCD における有限温度状態方程式の数値計算。グラディエント・フローを用いる SFtX 法によるエネルギー運動量テンソルの構成は、まず、クォークを含まないいわゆるクエンチ QCD の熱力学量の数値計算によってテストが行われた (2013 年)。その当時は格子ゲージ場配位の数も少なく、また格子間隔も粗く、既存の結果と比べて誤差も大きなものであった。ここでは、より細かい格子での多数のゲージ場配位、また、Harlander らにより得られた SFtX 法の 2 ループまでの係数を用いることで、この計算法が他の計算法と比較して遜色のない、その有効性に全く疑問のない方法であることが実証された。
7. エネルギー運動量テンソルの相関関数と粘性係数の数値計算。エネルギー運動量テンソルの 2 点関数は、久保公式を通じてクォークグルーオンプラズマの粘性係数を与える。この粘性係数は、重イオン衝突を流体記述する際の基本パラメータを与え、多大の関心が持たれる。我々は、SFtX 法で構成されたエネルギー運動量の有限温度 QCD での 2 点関数を計算し、極めて preliminary な結果ではあるが、粘性係数の評価を試みた。
8. グラディエント・フローによる、フェルミオン双二次演算子 (カイラルカレント、(擬)スカラー密度) の構成。理論的定式化と数値実験。これに関連して有限温度 QCD のカイラル感受率とトポロジカル感受率の測定。SFtX 法は、エネルギー運動量テンソルにとどまらず、任意の複合演算子の正則化によらない普遍的な構成に適用することができる。ここでは、QCD のカイラル対称性の実現と関連した、クォークのカイラルカレントや (擬)スカラー密度演算子の構成を定式化した。また、これらの構成を用いて、有限温度の QCD におけるカイラル感受率とトポロジカル感受率の数値計算も行い、カイラル Ward-高橋恒等式と consistent な結果を得た。
9.  $2+1$  フレーバー QCD の有限温度状態方程式 (温度の関数としてのエネルギー密度と圧力) の数値計算。これは SFtX 法によるエネルギー運動量テンソルの構成の現時点で最も重要な応用例である。通常、場の理論の熱力学量の非摂動的計算では、物理量を一定に保ちつつ格子間隔を変化させるための格子作用パラメータの変分 (いわゆるベータ関数) を数値的に決定することが必要となるが、この作業はクォークのようなフェルミオンが存在する場合には莫大な計算量を必要とする。SFtX 法はエネルギー運動量テンソルを直接定義できるので、必要な計算量を一気に低減できる。熱力学量は、エネルギー運動量テンソルの有限温度期待値 (1 点関数) で与えられる。我々はこの方法を用い、 $2+1$  フレーバー QCD において、 $ud$  クォークが現実より多少重い場合、およびクォーク質量が現実の値の場合 (物理点) に対して熱力学量の数値計算を行って来た。これまで、格子誤差が小さいと考えられる温度領域では、従来の方法 (積分法) によるものと consistent な結果が得られている。今後は、格子ゲージ場の有限温度配位をさらに生成し、連続外挿を取る必要がある。この方向の研究は、現在進行中の科研費基盤研究 (B) 「有限温度 QCD における物理量の決定へ向けて」において遂行中である。
10. SFtX 法による 4 クォーク演算子の構成に関する理論的研究。4 クォーク演算子は  $K$  中間子の  $B$  パラメータなど、ハドロンに対する弱い相互作用の効果を表すものとして重要であるが、カイラル対称性を破る通常の格子ゲージ理論の計算では演算子のくりこみが複雑化す

る困難がある。我々は、この問題を SFtX 法により回避することを提案し、具体的な構成の表式を得た。今後数値計算への具体的な応用が待たれる。

11. クエンチ QCD の一次相転移温度直上での高温相と低温相間の潜熱の数値計算。クォークを含まないいわゆるクエンチ QCD の有限温度の閉じ込め / 非閉じ込め相転移は一次相転移であり、高温相と低温相の相共存が起こる。この二相間のエネルギー密度の差 (潜熱) はこの相転移の基本的物理量であるが、この量の非摂動的計算は従来の方法では容易ではない。我々は SFtX 法に基づくエネルギー運動量テンソルの構成を用いて、この量が精度良く測定できることを数値計算によって示した。
12. グラディエント・フローに基づく厳密くりこみ群の定式化。Wilson 流のくりこみ群における疎視化の概念とグラディエント・フローの類似性はかねてより指摘されており、両者の関係に関する様々な研究が存在する。ここでは、まず、スカラー場理論の場合に対して、通常の Polchinski 方程式に従う Wilson 作用で計算される相関関数と、フローされたスカラー場の相関関数の同一性を示した。さらにこの対応のゲージ場理論への自然な拡張に基づいて、ゲージ場理論における新しい厳密くりこみ群の方程式を定式化した。この厳密くりこみ群方程式はゲージ対称性を明白に保つ点が最大の特徴で、今後、ゲージ場理論におけるくりこみ群固定点の解析などへの応用が大いに期待される。
13. SFtX 法による小フロー時間極限での漸近形の決定。SFtX 法では、本来フロー時間 0 の極限を取る必要があるが、実際の格子数値シミュレーションでは格子間隔が有限の情報を用いるため、数値データをゼロフロー時間に外挿する必要がある。この外挿をどのような関数で行うべきか、くりこみ群的な解析を用いてエネルギー運動量テンソルの場合に明らかにした。今後、SFtX 法におけるゼロフロー時間外挿に付随した系統誤差の削減に大いに役立つと期待している。

なお、SFtX 法全般に関する解説として、

鈴木 博、グラディエントフローによる格子ゲージ理論のエネルギー運動量テンソル、科研費 NEWS 2016 年度 VOL. 1、10

Hiroshi Suzuki, Energy-momentum tensor on the lattice: recent developments, Proceedings of Science Vol. 256, LATTICE2016 (2017) 002

鈴木 博、格子ゲージ理論におけるエネルギー・運動量テンソルの構成 : Gradient flow の方法、日本物理学会誌、73 巻 3 号、2018、148-153

鈴木 博、グラディエントフロー-エネルギー運動量テンソルへの応用を中心として、原子核研究、64 号、2019、52-64

が挙げられる。

これら以外にも、Kaplan と Grabowska によるグラディエント・フローに基づいたカイラルゲージ理論の定式化の成否に関する研究、赤外リノーマロンの不定性を取り除いたグルーオン凝縮の定義に関する研究、S1 コンパクト化された理論における赤外リノーマロンに関する研究、などを行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 30件）

1. 著者名 Ishikawa Kosuke, Morikawa Okuto, Nakayama Akira, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Infrared renormalon in the supersymmetric $\mathbb{C}P^{N-1}$ model on $\mathbb{R} \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa002	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 Ashie Masahiro, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa, Takeuchi Kengo	4. 巻 2020
2. 論文標題 Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz157	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 Ishikawa Kosuke, Morikawa Okuto, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Renormalon structure in compactified spacetime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz147	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 Ishikawa Kosuke, Okuto Morikawa, Shibata Kazuya, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Vacuum energy of the supersymmetric $\mathbb{C}P^{N-1}$ model on $\mathbb{R} \times S^1$ in the $S^1/N$ expansion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa066	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 Taniguchi Yusuke, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Umeda Takashi, WHOT-QCD Collaboration	4. 巻 102
2. 論文標題 Nf=2+1 QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.014510	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 Ashie Masahiro, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 More on the infrared renormalon in SU (N) QCD(adj.) on $\mathbb{R}^3 \times S^1$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa096	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 Suzuki Asobu, Taniguchi Yusuke, Suzuki Hiroshi, Kanaya Kazuyuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.034508	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 WHOT-QCD Collaboration, Shirogane Mizuki, Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa184	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 Sonoda Hidenori, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gradient flow exact renormalization group	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab006	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 Baba Atsushi, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Asobu, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 363
2. 論文標題 Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0191	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 Kanaya Kazuyuki, Baba Atsushi, Suzuki Asobu, Ejiri Shinji, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 363
2. 論文標題 Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0088	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 Makino Hiroki, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty050	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 Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Axial U(1) anomaly in a gravitational field via the gradient flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty073	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 Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Numerical study of the N=2 Landau-Ginzburg model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty088	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 Kasai Aya, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Gradient flow representation of the four-dimensional N=2 super Yang-Mills supercurrent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty117	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 Iritani Takumi, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Takaura Hiromasa	4. 巻 2019
2. 論文標題 Thermodynamics in quenched QCD: energy-momentum tensor with two-loop order coefficients in the gradient-flow formalism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz001	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 Sonoda Hidenori, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Derivation of a gradient flow from the exact renormalization group	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz020	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 Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi	4. 巻 96
2. 論文標題 Exploring Nf=2+1 QCD thermodynamics from the gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.014509	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 Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Shirogane Mizuki, Wakabayashi Naoki, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi	4. 巻 256
2. 論文標題 Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.256.0058	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 Hieda Kenji, Kasai Aya, Makino Hiroki, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2017
2. 論文標題 4D N=1 SYM supercurrent in terms of the gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx073	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 Makino Hiroki, Morikawa Okuto, Suzuki Hiroshi	4. 巻 2017
2. 論文標題 One-loop perturbative coupling of A and Astar through the chiral overlap operator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx085	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 Hiroki Makino, Okuto Morikawa, Hiroshi Suzuki	4. 巻 175
2. 論文標題 One-loop perturbative coupling of A and Astar through the chiral overlap operator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817511013	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 Kenji Hieda, Aya Kasai, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki	4. 巻 175
2. 論文標題 4D N = 1 SYM supercurrent on the lattice in terms of the gradient flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817511014	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 Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo KitazawaHiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takash Umeda	4. 巻 175
2. 論文標題 Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817507023	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 Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda	4. 巻 175
2. 論文標題 Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817507013	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 Hisashi Iha, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor gauge theories: a conformal bootstrap approach	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw046	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 Kenji Hieda, Hiroki Makino, Hiroshi Suzuki	4. 巻 B918
2. 論文標題 Proof of the renormalizability of the gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 23-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2017.02.017	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 Kenji Hieda, Hiroshi Suzuki	4. 巻 A31
2. 論文標題 Small flow-time representation of fermion bilinear operators	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S021773231650214X	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 Ken-ichi Okumura, Hiroshi Suzuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw167	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 Masakiyo Kitazawa, Takumi Iritani, Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Hiroshi Suzuki	4. 巻 D94
2. 論文標題 Equation of State for SU(3) Gauge Theory via the Energy-Momentum Tensor under Gradient Flow	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.114512	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 Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda	4. 巻 D95
2. 論文標題 Topological susceptibility in finite temperature ( 2+1 )-flavor QCD using gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.054502	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 Kanaya Kazuyuki, Ejiri Shinji, Iwami Ryo, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Taniguchi Yusuke, Umeda Takashi, Wakabayashi Naoki	4. 巻 256
2. 論文標題 Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.256.0063	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 Taniguchi Yusuke, Ejiri Shinji, Kanaya Kazuyuki, Kitazawa Masakiyo, Suzuki Hiroshi, Umeda Takashi, Iwami Ryo, Wakabayashi Naoki	4. 巻 256
2. 論文標題 Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.256.0064	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 Suzuki Hiroshi	4. 巻 256
2. 論文標題 Energy-momentum tensor on the lattice: recent developments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.256.0002	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19件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Application of the gradient flow to the energy-momentum tensor
3. 学会等名 Advances in Lattice Gauge Theory 2019, CERN, Geneva (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Gradient flow and the EMT on the lattice
3. 学会等名 Frontiers in Lattice QCD and related topics, YITP, Kyoto University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 IR renormalon in a compactified spacetime
3. 学会等名 KEK Theory workshop 2019, KEK, Tsukuba (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 有限温度量子色力学のダイナミクス
3. 学会等名 JHPCN第12回拠点シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 The vacuum angle is a marginal parameter
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 鈴木博
2. 発表標題 Small Flow time expansion (SFtX)法による2+1フレーバーQCDの熱力学
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 鈴木博
2. 発表標題 ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow
3. 学会等名 The 10th International Conference on Exact Renormalization Group 2020 (ERG2020), YITP, Kyoto University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 グラディエント・フローによる量子色力学の状態方程式
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）第10回シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Thermodynamic quantities in the $N_f=2+1$ QCD; the case of somewhat heavy $ud$ quarks
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 A new domain-wall lattice formulation of chiral gauge theories
3. 学会等名 Yukawa Institute Workshop Strings and Fields 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Reconstruction of the tunneling amplitude from the perturbation series
3. 学会等名 RIMS-iTHEMS International Workshop on Resurgence Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 One-loop perturbative coupling of $A$ and $A^*$ through the chiral overlap operator
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Gradient flow and the Wilsonian renormalization group flow
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木博
2. 発表標題 Gravitational axial U(1) anomaly via the gradient flow
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Energy-momentum tensor on the lattice: recent developments
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Lattice Field theory (LATTICE2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木 博
2. 発表標題 Proof of the renormalizability of the gradient flow
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi Suzuki
2. 発表標題 Fermion number anomaly with the fluffy mirror fermion
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木 博
2. 発表標題 4D N=1 SYM supercurrent in terms of the gradient flow
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 鈴木博	4. 発行年 2019年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 100
3. 書名 数理科学 2019年2月号 No.668 「量子アノマリーと経路積分」	

1. 著者名 鈴木博	4. 発行年 2017年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 2
3. 書名 数理科学2017年 11月号	

1. 著者名 鈴木博	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本物理学会	5. 総ページ数 6
3. 書名 日本物理学会誌73巻第3号	

〔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
研究協力者	高浦 大雅  (Takaura Hiromasa)  (70836858)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・KEK理論センター・科研費研究員    (82118)	
研究協力者	牧野 広樹  (Makino Hiroki)	九州大学・理学研究院・テクニカルスタッフ    (17102)	

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