

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540306

研究課題名(和文) 量子色力学の非摂動的性質とクォーク・グルーオン多体系のダイナミクス

研究課題名(英文) Nonperturbative Properties of Quantum Chromodynamics and Quark-Gluon Systems

研究代表者

菅沼 秀夫 (SUGANUMA, Hideo)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10291452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に基づいて、核子や中間子などのハドロンに関する諸性質や真空の非摂動的構造を、より基本的な物質階層であるクォーク・グルーオンのレベルから研究した。“格子QCD理論の大規模数値計算”と“解析的なQCD有効理論”の双方を用いて、QCDの重要な非摂動的現象である“クォークの閉じ込め”や“カイラル対称性の自発的破れ”をはじめ、クォーク、グルーオン、ハドロンの基礎的性質、高温でのQCD相転移等の研究を行った。特に、クォーク閉じ込めとカイラル対称性の破れとの関連性と独立性、及び、格子QCDを用いた双対超伝導描像に基づくクォークの閉じ込め機構の解明を進展させた。

研究成果の概要(英文)：Based on quantum chromodynamics (QCD), which is the fundamental theory of the strong interaction, we study hadrons such as nucleons and mesons and nonperturbative vacuum structure in terms of underlying elementary particles of quarks and gluons. Using both of lattice QCD first-principle calculations and analytical QCD effective theories, we study quark confinement and spontaneous chiral-symmetry breaking, nonperturbative basic properties of quarks, gluons and hadrons, and QCD phase transition at high temperatures. In particular, we find the relation between quark confinement and chiral symmetry breaking in QCD, and also clarify the quark confinement mechanism based on the dual superconductor picture.

研究分野：素粒子・原子核理論

キーワード：量子色力学(QCD) クォーク グルーオン カラーの閉じ込め カイラル対称性 格子ゲージ理論 ハドロン クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)

## 1. 研究開始当初の背景

低エネルギー領域での量子色力学(QCD)は、その強結合性のために、“真空そのもの”がその性質を大きく変えており、非常に複雑な構造を有している。従って、標準的な摂動論は適用できず、理論的な分析は非常に困難な反面、“カラーの閉じ込め”、“カイラル対称性の自発的な破れ”、“非自明な真空のトポロジ”、“高温・高密度・強電磁場での多様な相転移現象”等、実に多彩な物理現象の豊富にもなっている。そして、その理論的解明は、素粒子・原子核物理学に残された最重要課題の1つとして位置づけられている。また、QCDの数理は数学的にも非常に重要であり、その数学的解明は、ミレニアム問題としてクレイ数学研究所から100万ドルの懸賞金がかけられている超難問でもある。

QCDの非摂動的現象やハドロンの諸性質を理解する為に、過去、様々な有効模型や理論的方法が案出され、それぞれ一定の成果を挙げてきた。しかしながら、それらの多くは、現象の記述には役立つ反面、強い相互作用の基礎理論であるQCDからは程遠い仮定から出発していたり、様々な近似を行った結果、理論的にどの程度の信頼性が残っているのか不明瞭であった。

その点、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDモンテカルロ計算は、QCDやクォーク・ハドロンの物理において、信頼できる唯一の非摂動的解析方法であり、近年の計算機技術の飛躍的な発展に支えられて非常に成功をおさめた。実際、様々なハドロンの質量やクォーク間ポテンシャルなどが精度良く計算され、また有限温度でのQCD相転移の様相が定量的に予言されるなどした。そして、クォーク・ハドロン物理学への様々な応用ができる段階になってきていた。

実験的にも、この分野は非常に活性化している。米国ブルックヘブンでのRHIC実験により、1兆度以上の高温のクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相という全く新しい物質相が作られた。これは初期宇宙の実験室的な再現でもある。そして、相転移点近傍のQGPが当初の予想以上に強相関係で完全流体に近いという性質なども明らかにされた。また、更に超高温のQGPの生成がLarge Hadron Collider(LHC)のALICE実験で計画されるなど、依然ホットな研究テーマになっていた。

KEKのBファクトリーのBelle実験等からも、チャームクォークを含む新たなハドロンの続々と発見され、そのうちX(3872)などは4個のクォーク/反クォークで構成される“テトラクォーク”、Y(3840)などはバレンス・グルーオンを含む“ハイブリッド粒子”と考えられている。これは高エネルギー実験とハドロン物理とを結びつける新しい学術的潮流であり、両分野の交流が活発になってきていた。また、これら新粒子の発見は、

これまでのハドロンの描像やクォーク模型に対する認識を改めて問い直す重要な契機を与えるものであり、クォークの閉じ込め機構や、ハドロン内でのクォーク・グルーオンの相互作用といった基礎的性質のQCDからの解明がクローズアップされてきた。

この様に、本研究課題である非摂動的QCD及びクォーク・グルーオン多体系の物理は、理論的にも実験的にも広範な研究領域と密接に繋がってきており、国内外で学術的にも更に重要性を増してきていた。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、クォーク・グルーオンからハドロンの及ぶ物質の階層を主たる対象として、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に基づき、“カラーの閉じ込め”や“カイラル対称性の自発的破れ”等の非摂動的QCD真空の性質、クォーク・グルーオン多体系としてのハドロンの諸性質、高温・高密度等でのQCD相転移など、理論的にも実験的にも重要な諸課題を研究し『QCDに基づいたハドロンの物理学の構築』を目指した。

なお、素粒子の標準理論であるQCDに基づいて、核子や中間子などのハドロンの、及び、強い相互作用に関する諸性質を、より基本的な物質階層であるクォーク・グルーオンのレベルから系統的に解明し理解する事は、素粒子物理学と原子核物理学との空隙を埋める学術的にも重要なステップであり、その方向の研究は、近年世界的にも盛んになってきている。

本研究課題では、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを有用な研究手段として活用し、解析的な理論計算を取り込みつつ、「強い力の謎」に対する基本的階層からの解明を試みた。具体的な研究テーマとしては、カラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れなどのQCD真空の重要な非摂動的性質、クォークやグルーオンの非摂動的性質、クォーク・グルーオン多体系としてのハドロンの諸性質、高温・高密度・強電磁場でのQCD相転移、といった当該分野の重要課題を中心に、基礎理論であるQCDに基づいた研究を進めた。

## 3. 研究の方法

低エネルギー領域でのQCD及びハドロンの物理学における理論的困難は、主として、その強結合性に根ざした非摂動的性質に起因しており、場の量子論での標準的な解析方法である摂動論は適用できない。

この理論的に困難な課題に対して、本研究課題では、強い相互作用の第一原理計算である“格子QCDモンテカルロ計算”という厳密な場の量子論に基づく数値的解析方法を1つの中心的な研究手段として積極的に活

用する。格子 QCD 計算は、4 次元時空間連続体を有限体積で格子状に離散化することで、連続無限重積分であった経路積分を、有限重積分（数百万重積分程度）とし、それをモンテカルロ法によって評価する大規模数値計算である。近年の大型計算機の目覚ましい発展により、物理的諸量の計算のみならず、非摂動現象の背後にある物理的本質を抽出するなど、様々な応用が可能になってきた。

本研究課題では“解析的な QCD の有効理論”をもう 1 つの中心的研究手段として、場の量子論の解析的な計算と格子 QCD 計算とを比較するなど、両者を相補的に用いる事で、非摂動的な QCD 諸現象の背後にある物理や数理に対する考察や分析を行った。

なお、本研究課題の独創的な特徴の 1 つは格子 QCD 理論と QCD の有効理論の双方を用いる点であり、この融合的な研究スタイルは世界的にも稀少である。また、素粒子論と核理論の双方の様々な視点を取り入れて、QCD の非摂動現象を総合的に解明しようとしている点も独創的である。

#### 4. 研究成果

強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) に基づいて“カイラル対称性の自発的破れとクォークの閉じ込めの対応関係”“カラーの閉じ込めとその起源”等の一連の重要で独自性の高い研究を行った。なお、これらの研究の殆どが世界に先駆けたものであり、国内外で一定の高い評価を得ている。事実、研究成果は Physical Review 誌等の国際的な一流査読学術誌に掲載され、科研費期間内での招待講演を 6 回（国際会議で 4 回、日本物理学会での素粒子論・理論核物理合同シンポジウムで 1 回、国内研究会で 1 回）行っている。主な成果は以下の通りである。

(1) QCD は、低エネルギー領域において“カラーの閉じ込め”と“カイラル対称性の自発的破れ”という 2 つの顕著な非摂動的現象を示すが、それらの数学的・解析的な理解は極めて困難であり、その解明は素粒子原子核理論に残された最重要課題の 1 つであり、両者の対応関係も長年の未解決な課題である。

我々は、閉じ込めの秩序パラメータである“ポリヤコフ・ループ”とカイラル対称性の自発的破れと直接関連する“ディラック演算子の固有モード”との関係を世界で初めて解析的に導出した。この解析的な関係式に基づき、カイラル対称性の自発的破れの本質的な要素である低ディラック・モードの寄与が、閉じ込め現象に対しては小さいことを解析的に示し、また、格子 QCD を用いてもその事実を数値的に確認した。この結果は、QCD において“カイラル対称性の自発的破れ”と“クォークの閉じ込め”とが 1 対 1 には対応しない事を示すものである。

(2) 我々は、ディラック演算子の固有モードに着目し、ゲージ不変性を保ったまま、カイラル対称性の破れと閉じ込めの関係を調べる格子 QCD での新たな方法を開発した。それに基づいて、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD の大規模数値計算を実行し、閉じ込めポテンシャルやポリヤコフ・ループ、センター対称性と、ディラック・モードとの関係を調べた。その結果、カイラル対称性の自発的破れの本質的な要素である“低ディラック・モード”を取り除いても、クォークの閉じ込め力が殆ど変化せずに残ることを明らかにし、QCD において“カイラル対称性の自発的破れ”と“クォークの閉じ込め”とが 1 対 1 には対応しないことを、数値的ではあるが、世界で初めて基礎理論から直接示した。

(3) “閉じ込め現象”と“QCD の非可換性”との対応もまた長年の未解決課題の 1 つである。可換ゲージという特殊なゲージでは、長距離領域の QCD はグルーオン場の対角成分のみで記述されるという“アーベリアン・ドミナンス”という仮説がある。我々は、強い相互作用の第一原理計算である SU(3) カラーの格子 QCD を用いて、クォーク閉じ込めに対するアーベリアン・ドミナンス仮説を定量的に研究した。最大可換 (MA) ゲージにおいて非対角グルーオン成分を取り除く“アーベリアン射影”を行い、クォーク間ポテンシャルのアーベル部分を高精度で計算した。その結果、閉じ込め力がグルーオンの可換部分のみでほぼ完全に再現されることを世界で初めて示し、この現象を閉じ込めに対する“perfect Abelian dominance”と名づけた。

(4) 現実世界に対応する SU(3) カラーの QCD に対して、最大可換 (MA) ゲージでのグルーオン伝搬関数の格子 QCD による計算・解析を世界で初めて行った。クォーク閉じ込めはしばしば“双対超伝導描像”で説明できると期待されるが、この描像では“アーベリアン・ドミナンス”と“モノポール凝縮”が重要な鍵となる。我々は SU(3) QCD の MA ゲージでのグルーオンの伝搬関数を計算し、非対角グルーオンが 1 GeV 程度の大きな有効質量を有するため長距離の物理には寄与せず、低エネルギー領域で系が“アーベル化”し得る事を示した。

(5) QCD に対するシュウィンガー・ダイソン方程式 (SD) を定式化し数値的に解くことにより、クォークのテンソル荷の非摂動的解析計算を行い、あわせて核子の電気双極子モーメントへの非摂動的な寄与などを評価した。また、SD 方程式を用いて、クォークのスカラー

一荷、軸性ベクトル荷、擬スカラー荷の非摂動的解析計算を行った。

(6) 格子 QCD を用いて閉じ込めの物理的描像と低運動量グルーオンの寄与に関する研究を行った。クーロン・ゲージではファデーフ・ポポフ(FP)演算子の低固有値成分が、大きなカラー・クーロン・エネルギーを与え、クォークの閉じ込めに重要な役割を果たすと推測されているが、我々は、格子 QCD で得られたクーロン・ゲージでの非摂動的 QCD 真空のグルーオン配位から、低運動量のグルーオン成分を除去すると、FP 演算子の低固有状態が消失し、同時に閉じ込め力も消失することを明らかにした。これは、低運動量グルーオン、FP ゼロモード、及び、閉じ込め現象の間の密接な相関を示すものである。

(7) ランダウ・ゲージなど適当なゲージの下で SU(3) 格子 QCD におけるリンク変数をフーリエ変換し、運動量空間でのグルーオンの寄与を解析することにより、QCD の非摂動的な諸現象に対して“重要なグルーオン運動量成分”を特定する一般的な方法を開発した。この方法を用いて、グルーオンの 1.5GeV 以下の運動量成分が、QCD 真空での“クォークの閉じ込め”をもたらすこと等を示した。また、hadron string の励起状態が 高運動量グルーオンに敏感であること等も示した。

(8) 一定の強い(カラーの)電磁場が共存する系では、質量ゼロのフェルミオン(クォーク)の単位時空での対生成率が無限大になり、真空が必ず崩壊することを指摘した。強磁場中では、最低ランダウ準位の寄与が主要であり、対生成率の発散もこの最低ランダウ準位の寄与だけで説明できることを示した。更に、強磁場での有効理論を定式化し、それが 2 次元低い低次元系の理論になる事、及び 対生成率の発散の背景にはアノマリーが起源としてあること等を示した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 29 件)

N. Sakumichi and H. Suganuma,  
Perfect Abelian Dominance of  
Quark Confinement in SU(3) QCD,  
Phys. Rev. **D90** (2014) 111501(R) (1-6).  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.111501>  
T. M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani,  
Relation between Confinement and  
Chiral Symmetry Breaking in  
Temporally Odd- Number Lattice QCD,  
Phys. Rev. **D90** (2014) 094505 (1-15).

査読有

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.094505>

T. Iritani and H. Suganuma,  
Lattice QCD Analysis of the Polyakov Loop  
in terms of Dirac Eigenmodes,  
Prog. Theor. Exp. Phys. **2014** (2014)  
033B03 (1-20). 査読有

DOI: [10.1093/ptep/ptu030](https://doi.org/10.1093/ptep/ptu030)

N. Yamanaka, S. Imai, T. M. Doi and  
H. Suganuma,  
Quark Scalar, Axial and Pseudoscalar  
Charges in the Schwinger-Dyson Formalism,  
Phys. Rev. **D89** (2014) 074017 (1-28).

査読有

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.074017>

H. Suganuma, T. M. Doi and T. Iritani,  
Analytical Relation between Confinement  
and Chiral Symmetry Breaking in terms of  
Polyakov Loop and Dirac Eigenmodes in  
Odd-Number Lattice QCD,  
Proc. Sci. (QCD-TNT-III) (2014) 042 (1-12).  
査読有

URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/193/042/QCD-TNT-III\\_042.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/193/042/QCD-TNT-III_042.pdf)

H. Suganuma, T. M. Doi and T. Iritani,  
Analytical Relation between Quark  
Confinement and Chiral Symmetry Breaking  
in Odd-Number Lattice QCD,  
Eur. Phys. J. Web of Conf. **71** (2014) 00129  
(1-8). 査読有

DOI:<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147100129>

S. Gongyo and H. Suganuma,  
Gluon Propagators in Maximally Abelian  
Gauge in SU(3) Lattice QCD,  
Phys. Rev. **D87** (2013) 074506 (1-12).

査読有

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.074506>

N. Yamanaka, T.M. Doi, S. Imai and

H. Suganuma,

Quark Tensor Charge and Electric Dipole  
Moment within the Schwinger-Dyson  
Formalism,

Phys. Rev. **D88** (2013) 074036 (1-16).

査読有

DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.074036>

H. Suganuma, T. M. Doi and T. Iritani,  
Analytical Relation between Quark Confinement  
and Chiral Symmetry Breaking in QCD,  
Proc. Sci. (Hadron 2013) (2013) 121 (1-5).  
査読有

URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/121/Hadron%202013\\_121.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/121/Hadron%202013_121.pdf)

T. M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani,  
Lattice QCD Study for Relation between  
Confinement and Chiral Symmetry Breaking

on Temporally Odd-Number Lattice,  
Proc. Sci. (Hadron 2013) (2013) 122 (1-5).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/122/Hadron%202013\\_122.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/122/Hadron%202013_122.pdf)  
N. Yamanaka, T. M. Doi, S. Imai and  
H. Suganuma,  
Quark Tensor and Axial Charges within the  
Schwinger-Dyson Formalism,  
Proc. Sci. (Hadron 2013) (2013) 123 (1-5).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/123/Hadron%202013\\_123.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/123/Hadron%202013_123.pdf)  
S. Imai and H. Suganuma,  
A Non-perturbative Effect of Gluons for Scalar  
Diquark in the Schwinger-Dyson Formalism,  
Proc. Sci. (Hadron 2013) (2013) 148 (1-5).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/148/Hadron%202013\\_148.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/205/148/Hadron%202013_148.pdf)  
H. Suganuma, T. M. Doi and T. Iritani,  
Analytical Relation between the Polyakov  
Loop and Dirac Eigenvalues in Temporally  
Odd-Number Lattice QCD,  
Proc. Sci. (Lattice 2013) (2013) 374 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/374/LATTICE%202013\\_374.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/374/LATTICE%202013_374.pdf)  
T. M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani,  
A Direct Relation between Confinement and  
Chiral Symmetry Breaking in Temporally  
Odd-Number Lattice QCD,  
Proc. Sci. (Lattice 2013) (2013) 375 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/375/LATTICE%202013\\_375.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/375/LATTICE%202013_375.pdf)  
S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma,  
Gauge-Invariant Formalism with a  
Dirac-mode Expansion for Confinement and  
Chiral Symmetry Breaking,  
Phys. Rev. **D86** (2012) 034510 (1-11).  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.034510>  
S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma,  
Off-diagonal Gluon Mass Generation and  
Infrared Abelian Dominance in Maximally  
Abelian Gauge in SU(3) Lattice QCD,  
Phys. Rev. **D86** (2012) 094018 (1-5).  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.094018>  
T. Iritani and H. Suganuma,  
Lattice QCD Analysis for Faddeev-Popov  
Eigenmodes in terms of Gluonic Momentum  
Components in the Coulomb Gauge,  
Phys. Rev. **D86** (2012) 074034 (1-9).  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.074034>

H. Ueda, T. M. Doi, S. Fujibayashi,  
S. Tsutsui, T. Iritani and H. Suganuma,  
Lattice QCD Study for Stringy Excitation and  
Role of UV Gluons,  
Proc. Sci. (Confinement X) (2012) 046 (1-8).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/046/Confinement%20X\\_046.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/046/Confinement%20X_046.pdf)  
S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma,  
SU(3) Lattice QCD Study of the Gluon Propagator  
in Maximally Abelian Gauge: Off-diagonal Gluon  
Mass Generation and Infrared Abelian Dominance,  
Proc. Sci. (Confinement X) (2012) 050 (1-8).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/050/Confinement%20X\\_050.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/050/Confinement%20X_050.pdf)  
T. Iritani, S. Gongyo and H. Suganuma,  
Polyakov Loop Analysis with Dirac-mode  
Expansion,  
Proc. Sci. (Confinement X) (2012) 053 (1-8).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/053/Confinement%20X\\_053.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/053/Confinement%20X_053.pdf)  
21 H. Suganuma, S. Gongyo and T. Iritani,  
Lattice QCD Study of Confinement and Chiral  
Symmetry Breaking with Dirac- mode Expansion,  
Proc. Sci. (Confinement X) (2012) 081 (1-8).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/081/Confinement%20X\\_081.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/081/Confinement%20X_081.pdf)  
22 H. Ueda, T. M. Doi, S. Fujibayashi,  
S. Tsutsui, T. Iritani and H. Suganuma,  
Stringy Excitation and Role of UV Gluons in  
Lattice QCD,  
Proc. Sci. (Lattice 2012) (2012) 211 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/211/Lattice%202012\\_211](http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/211/Lattice%202012_211)  
23 S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma,  
Analytical Derivation of Gauge Fields from  
Link Variables in SU(3) Lattice QCD and its  
Application in Maximally Abelian Gauge,  
Proc. Sci. (Lattice 2012) (2012) 212 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/212/Lattice%202012\\_212](http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/212/Lattice%202012_212)  
24 H. Suganuma, S. Gongyo and T. Iritani,  
Dirac-Mode Expansion for Confinement and  
Chiral Symmetry Breaking,  
Proc. Sci. (Lattice 2012) (2012) 217 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/217/Lattice%202012\\_217](http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/217/Lattice%202012_217)  
25 T. Iritani, S. Gongyo and H. Suganuma,  
Dirac-Mode Expansion Analysis for  
Polyakov Loop,  
Proc. Sci. (Lattice 2012) (2012) 218 (1-7).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/218/Lattice%202012\\_218](http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/218/Lattice%202012_218)

- 26 H. Suganuma, S. Gongyo, T. Iritani and A. Yamamoto,  
Relevant Gluonic Momentum for Confinement and Gauge-Invariant Formalism with Dirac-mode Expansion,  
Proc. Sci. (QCD-TNT-II) (2011) 044 (1-12).  
査読有  
URL:[http://pos.sissa.it/archive/conferences/136/044/QCD-TNT-II\\_044.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/136/044/QCD-TNT-II_044.pdf)
- 27 H. Suganuma, T. Iritani, F. Okiharu, T.T. Takahashi and A. Yamamoto,  
Lattice QCD Study for Confinement in Hadrons,  
AIP Conf. Proc. 1388 (2011) 195-201.  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3647373>
- 28 Y. Hidaka, T. Iritani and H. Suganuma,  
Fast Vacuum Decay into Quark Pairs in Strong Color Electric and Magnetic Fields,  
AIP Conf. Proc. 1388 (2011) 516-519.  
査読有  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3647442>
- 29 Y. Hidaka, T. Iritani and H. Suganuma,  
Fast Vacuum Decay into Particle Pairs in Strong Electric and Magnetic Fields,  
Proc. Int. Conf. "Physics in Intense Fields", KEK, Japan, 24-26 Nov. 2010,  
KEK Proceedings (2011) 150-152. 査読無

[学会発表] (計 11 件) うち招待講演 6 件

- Hideo Suganuma, (招待講演)  
Perfect Abelian Dominance of Confinement in Quark-Antiquark Potential in SU(3) Lattice QCD,  
国際会議 "Quark Confinement and the Hadron Spectrum" (Confinement XI), Sep.7-13, 2014, St. Petersburg (Russia).  
菅沼秀夫,  
QCD におけるポリヤコフ・ループ (閉じ込め) とディラック固有モード (カイラル対称性の自発的破れ) の解析的關係,  
日本物理学会 第 69 回年次大会,  
2014 年 3/27-30, 東海大学 (神奈川県・平塚市)  
Hideo Suganuma,  
Analytical Relation between Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in QCD,  
国際会議 "Hadron Spectroscopy" (Hadron2013), Nov.8-12, 2013, Nara (Japan).  
Hideo Suganuma, (招待講演)  
Analytical Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking in terms of Polyakov Loop and Dirac Eigenmodes in Odd-Number Lattice QCD,  
国際会議 "From Quarks and Gluons to Hadronic Matter: A bridge too far?", Sep.2-6, 2013, Trento (Italy).  
Hideo Suganuma, (招待講演)  
Analytical Relation between Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in Odd-number Lattice QCD,  
国際会議 "New Frontiers in Physics",

- Aug.28-Sep.5, 2013, Crete (Greece).  
Hideo Suganuma,  
Analytical Relation between the Polyakov Loop and Dirac Eigenvalues in Temporally Odd-number Lattice QCD,  
国際会議 "Lattice Field Theory" (Lattice 2013) Jul.29-3 Aug.3, 2013, Mainz (Germany).  
菅沼秀夫, (招待講演・基調講演)  
閉じ込め現象とカイラル対称性の自発的破れの関連性について,  
日本物理学会第 68 回年次大会  
素粒子論・理論核物理合同シンポジウム  
2013 年 3/26-29, 広島大学 (広島県・東広島市)  
Hideo Suganuma,  
Lattice QCD Study of Confinement and Chiral Symmetry Breaking with Dirac-mode Expansion,  
国際会議 "Quark Confinement and the Hadron Spectrum" (Confinement X), Oct.8-12, 2012, Munich (Germany).  
菅沼秀夫, (招待講演)  
クォーク間ポテンシャルと閉じ込めの物理,  
新学術領域「素核宇宙融合」×「新八ドロン」クロスオーバー研究会,  
2012 年 7/12-13, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)  
Hideo Suganuma,  
Dirac-Mode Expansion for Confinement and Chiral Symmetry Breaking,  
国際会議 "Lattice Field Theory" (Lattice 2012), June 24-29, 2012, Cairns (Australia).  
Hideo Suganuma, (招待講演)  
Relevant Gluonic Momentum for Confinement and Gauge-Invariant Formalism with Dirac-mode Expansion,  
国際会議 "QCD Green's Functions, Confinement, and Phenomenology II", Sep.5-9, 2011, Trento (Italy).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

[その他]  
ホームページ等  
<http://homepage3.nifty.com/suganuma-kyoto/hideo/>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
菅沼 秀夫 (SUGANUMA, Hideo)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 1 0 2 9 1 4 5 2
- (3) 連携研究者  
国広 悌二 (KUNIHIRO, Teiji)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 2 0 1 5 3 3 1 4