

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05076

研究課題名(和文) 量子色力学に基づくクォーク・グルーオンの非摂動的性質とハドロンの諸性質の解明

研究課題名(英文) Nonperturbative Properties of Quarks, Gluons and Hadrons based on Quantum Chromodynamics

研究代表者

菅沼 秀夫 (Suganuma, Hideo)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10291452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：核子や中間子などのハドロンの諸性質や非摂動的真空の構造を、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に基づき研究した。方法としては、“格子QCD理論”の大規模数値計算と“ホログラフィックQCD”などの解析的方法を用いて、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”及び、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、有限温度も含めたクォーク閉じ込めとカイラル対称性の破れの関係性、双対超伝導描像に基づくカラーの閉じ込め機構の解明を進展させ、ホログラフィックQCDでのHダイバリオンの研究を世界で初めて行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の研究成果の学術的意義としては、素粒子であるクォーク・グルーオンの階層から、強い相互作用の基礎理論であるQCDを基軸として、真空の構造やハドロンなどの強結合の多体系を解明する点であり、「素粒子分野と原子核分野の学術的融合」に繋がるものである。また、従来、別々に研究される傾向が強かった、第一原理計算である「格子QCDの大規模数値シミュレーション」と解析的な「QCD有効理論」という、2方向の理論的アプローチを用いて総合的に研究を展開する点も新しいスタイルである。これらは、計算機物理学における物理的描像の抽出など「物理学の新たな方向性」に繋がる可能性を有している。

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

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 閉じ込め カイラル対称性 格子ゲージ理論 ホログラフィックQCD ハドロンの

1. 研究開始当初の背景

本研究課題が扱う低エネルギー領域での量子色力学 (QCD) 及びハドロン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、「真空の構造」さえも非自明に大きく変質してしまう点にある。こういった強い相互作用の物理学は、既存の摂動論では記述できない反面、カラーの閉じ込め現象、カイラル対称性の自発的破れ、インスタントンなどの非自明なトポロジー、高温・高密度などでの多様な相転移など、実に多彩な物理現象の宝庫にもなっている。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、その数学的解明に対しても、クレール数学研究所からミレニアム問題の1つとして100万ドルの懸賞金がかけられている。

こういった理論的難問に対して、1つの重要な方向性としては、近年のコンピュータの目覚ましい発展を反映して、大規模数値計算である格子QCD理論計算が盛んに行われている。それとは相補的に、解析的なモデル計算も行われてきたが、近年、超弦理論の枠組みからホログラフィックQCDという新たな非摂動的解析方法が登場し、理論的に活気づいてきていた。

実験的にも、今世紀に入り、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実験に引き続き、欧州CERNでのLarge Hadron Collider (LHC) のALICE実験により、2兆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、ホットな研究テーマになっている。これは初期宇宙の実験室的な再現でもあるが、相転移点近傍のQGPの物性は、実験以前の素朴な予想である“弱結合のガス”とは対照的に“強相関の完全流体”に近いという性質も含め、多くの物理的に重要な実験結果が得られてきている。また高密度のコンパクト天体である中性子星についても観測が進み、太陽質量の約2倍の大質量の中性子星が観測され、高密度での状態方程式の見直しが迫られた。更に、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星は、 10^{11} テスラ (地磁気の千兆倍程度) という超強磁場を有し「超強磁場での物理」という新たな研究分野の可能性を呈示していた。

更には、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「テトラクォーク」候補 X(3872) など新種のハドロンが続々と発見され、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や両分野間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。

こういった学術的背景の下で、本研究課題では、強い相互作用の基礎理論であるQCDに基づき、クォーク・グルーオン非摂動的性質、新種のハドロンであるマルチクォーク系、および、高温・高密度・強磁場といった様々な極限状況での解明を目指して研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究課題では、グローバルな視座としては、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、クォーク・グルーオンからハドロンに及ぶ極微な物質の階層を研究し、『QCDに基づいたハドロン物理学の構築』を目指した。特に、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れなどのQCDの非摂動的真空の重要な性質、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、高温・高密度・強磁場などでの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、および、強い相互作用の諸性質を、よりミクロ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方向性は、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鍵であり、こういった潮流は、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理論の大規模数値シミュレーションや、ホログラフィックQCDなどの解析的な理論計算を用いて、当該分野の重要課題を中心に、QCDやクォーク・グルーオンのレベルでの解明を試みた。具体的な研究テーマとしては、(1) QCD真空の重要な非摂動的性質であるクォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの関連性に対する研究と有限温度への拡張、(2) クォーク多体系におけるクォーク閉じ込め力の定量的解明や双対超伝導描像に基づくクォーク閉じ込め機構の解明、(3) 超弦理論から導かれるホログラフィックQCDを用いたバリオン数 $B=2$ のHダイバリオン(uuddss)の研究、(4) 解析的なシュウィンガー・ダイソン方程式によるスカラークォークやダイクォークの有効質量の研究、(5) 物質と反物質を共存させることによる有限密度QCDの数値的計算法の試み、(6) ホログラフィック双対を用いたフレーバー数1の $1+1$ 次元QCDのバリオンに対する不安定性の研究、(7) 臨界強磁場での非可換ヒッグス理論における新種の閉じ込め現象の研究などを行った。

3. 研究の方法

QCDは、低エネルギー領域では強結合性を示し、真空の構造まで非自明に変質させてしまい、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。この強結合性がもたらす多様な非摂動的性質が、理論的解析を極めて困難なものにしている。この理論的に困難な課題に対して、本研究課題では、2つの異なる理論的アプローチを用いて、多面的な理解を試みた。

1つは、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であり、これを中心的な研究手段として積極的に活用した。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）に還元し、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。

本研究課題のもう1つの研究手段としては、超弦理論でのDブレーン系から「ゲージ・重力対応」を援用して導かれるホログラフィックQCDや、QCDのシュウィンガー・ダイソン方程式など、QCDに基づく解析的なアプローチである。なお、本研究課題の独自の特徴の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自の点である。

4. 研究成果

強い相互作用の基礎理論であるQCDに基づき、カラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとの関連性とQGP相など有限温度QCD系への拡張、クォーク多体系でのクォーク閉じ込め力と閉じ込め機構の解明、ホログラフィックQCDを用いたHダイバリオン（6クォーク系）の研究などの、当該分野の重要課題に関する研究を行い、原著査読論文や査読付きの国際会議論文として公表した。なお、これらの研究のほとんどが世界に先駆けた独自性の高いものである。以下に、主な成果を列挙する。

1. カラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとの関連性と独立性

カラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとの対応関係も長年の未解決課題の1つである。我々は、閉じ込めの指標となる ポリヤコフ・ループ、ウィルソン・ループ、クォーク閉じ込め力 (string tension) のそれぞれに対して、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。

これらの関係式から、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・モードの寄与は、閉じ込め現象に対しては小さいことを、ユニタリー群のコンパクト性なども援用して、解析的に示した。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、「クォークの閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」とが1対1には対応せず、両者の強い独立性を示すものである。

また、軽いダブラーが無いドメイン・ウォール・フェルミオンなどについても、同様な解析的表式を導出し、QCDにおける閉じ込めとカイラル対称性の破れとの強い独立性を示した。

2. 有限温度QCD相転移における閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとの関連性

更に、有限温度QCDでの相転移に応用し、ポリヤコフ・ループ感受率のディラック・モード展開の解析的な表式も導出し、有限温度でのQCD相転移においても、閉じ込めとカイラル対称性の破れとの強い独立性を明らかにした。

3. バリオン中のクォーク閉じ込め力に対する高精度の格子QCD計算

強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを用いて、核子などのバリオン中での3つのクォーク間のポテンシャルに対する高精度の計算を行い、バリオン中でのクォーク閉じ込めが“Y型の線型ポテンシャル”になることを再確認した。尚、これは2000年頃に我々が世界で初めて示した結果の高統計版である。また、格子QCDを用いて、ペンタクォーク、テトラクォークなどのクォーク多体系における“クォーク閉じ込め力”等の諸性質の研究を行った。

4. 格子QCDを用いたクォークの閉じ込めに対する双対超伝導描像の定量的研究

クォークの閉じ込め機構の有力な仮説の1つに、南部・トーフト・マンデルスタムが提唱した「双対超伝導描像」がある。これは、QCD真空を「超伝導と双対な系」と捉え、QCDモ

ノポールの凝縮により、カラー電束の1次元化を説明する物理的な描像である。

我々は、最大可換ゲージでのSU(3) QCDに対して、大きなサイズでの高統計の格子QCD計算を行い、非対角グルーオン成分を取り除く“アーベリアン射影”により、「クォークに対する閉じ込め力」への、対角/非対角グルーオン成分の寄与を定量的に精査した。その結果、中間子とバリオン(3クォーク系)の双方に対して、ハドロン中でのクォーク閉じ込め力がグルーオンの可換(対角)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、これに対して perfect Abelian dominance と名づけた。

また、中間子やバリオン中での「クォーク閉じ込め力」に対する、QCDモノポールの寄与を高精度で計算した。その結果、中間子とバリオンの双方について、クォーク閉じ込めに対して、QCDモノポールの寄与が主要である等の「モノポール・ドミナンス」を定量的に示した。

5. ホログラフィックQCDによるバリオン数2のHダイバリオン(6クォーク系)の研究

超弦理論のDブレーン系から導かれるホログラフィックQCDにおいて、バリオン数が2のカイラル・ソリトン解として現れる“H粒子(uuddss)”に対する研究を世界で初めて行い、カイラル極限でのH粒子の質量やサイズなどの諸性質を明らかにした。

6. シュウィンガー・ダイソン方程式によるスカラークォークやダイクォークの研究

ダイクォークを“拡がりを持ったスカラークォーク”とみなし、それに対するシュウィンガー・ダイソン方程式を定式化し数値的に解く事により、ダイクォークの有効質量と拡がりを調べた。

7. 物質と反物質を共存させることによる有限密度QCDの数値的計算法の試み

粒子と反粒子が別空間に共存する有限密度QCD系を考え、この系とサイン問題が生じない「アイソスピン化学ポテンシャルQCD系」とを1パラメータで繋ぎ、外挿することで、有限密度QCDにおいて、数値計算が可能な密度領域を拓けようとする方法を提案した。

8. ホログラフィック双対を用いたフレーバー数1の1+1次元QCDのバリオンの研究

フレーバー数が1の1+1次元QCDに対応するホログラフィックQCDにトポロジカル・ソリトンとして現れるバリオンを研究し、それがスケール変換の下で不安定になることを示した。

9. QCDにおける「カラーの閉じ込め」と「強磁場中の物理」の類似性の研究

強磁場中では、荷電粒子の最低ランダウ準位のみが主要化し、空間自由度が1次元的になり、閉じ込めの鍵である「カラー電束の1次元化」と類似の状況になる。そこで、QCDとは異なる“非可換ヒッグス理論”に強磁場を印加した系での閉じ込め現象の発現を調べ、荷電ベクトル場がゼロ質量になる「臨界強磁場」中での非可換ヒッグス系では、磁場方向に「空間1次元的な強相関」が生じ、QCDの閉じ込めに特徴的な線型ポテンシャルが現れることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計23件)うち 査読有が22件, 国際雑誌掲載が22件

1. H. Suganuma, “Non-abelian Higgs Theory in a Strong Magnetic Field and Confinement”, Proceedings of Science (**Confinement 2018**) (2018) 064 (8 pages). (査読有)
<https://pos.sissa.it/336/064/pdf>
2. H. Suganuma and N. Sakumichi, “Monopole Dominance of Confinement in SU(3) Lattice QCD”, Proceedings of Science (**Confinement 2018**) (2018) 267 (8 pages). (査読有)
<https://pos.sissa.it/336/267/pdf>
3. H. Suganuma, T. M. Doi, K. Redlich and C. Sasaki, “Relating Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in QCD”, Journal of Physics **G: Nuclear and Particle Physics** **44** (2017) 124001 (19 pages). (査読有, 招待論文) DOI: 10.1088/1361-6471/aa8e2f

4. [H. Suganuma](#), “Matter-Antimatter Coexistence Method for Finite Density QCD toward a Solution of the Sign Problem”, *Journal of Modern Physics* **8** (2017) 2034-2041. (査読有、招待論文)
DOI: 10.4236/jmp.2017.812123
5. T. M. Doi, K. Redlich, C. Sasaki and [H. Suganuma](#), “Polyakov Loop Fluctuations in terms of Dirac Eigenmodes”, *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement* **10** (2017) 543-547. (査読有)
DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.10.543
6. [H. Suganuma](#), T. M. Doi, K. Redlich and C. Sasaki, “Interplay between Deconfinement and Chiral Properties”, *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement* **10** (2017) 741-745. (査読有)
DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.10.741
7. [H. Suganuma](#), “Matter-Antimatter Coexistence Method for Finite Density QCD”,
Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement **10** (2017) 989-994. (査読有)
DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.10.989
8. [H. Suganuma](#), T. M. Doi, K. Redlich and C. Sasaki, “Some Relations for Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in QCD”, *European Physical Journal Web of Conferences* **137** (2017) 04003 (11 pages). (査読有) DOI: 10.1051/epjconf/201713704003
9. [H. Suganuma](#) and K. Matsumoto, “Holographic QCD for H-dibaryon (uudds)”,
European Physical Journal Web of Conferences **137** (2017) 13018 (6 pages). (査読有)
DOI: 10.1051/epjconf/201713713018
10. [H. Suganuma](#), Y. Nakagawa and K. Matsumoto, “1+1 Large Nc QCD and its Holographic Dual - Soliton Picture of Baryons in Single-Flavor World”, *Japan Physical Society Conference Proceedings* **13** (2017) 020013 (5 pages). (査読有) DOI: 10.7566/JPSCP.13.020013
11. K. Matsumoto, Y. Nakagawa and [H. Suganuma](#), “A Study of the H-dibaryon in Holographic QCD”,
Japan Physical Society Conference Proceedings **13** (2017) 020014 (5 pages). (査読有)
DOI: 10.7566/JPSCP.13.020014
12. [H. Suganuma](#), T. M. Doi and T. Iritani, “Analytical Formulae of the Polyakov and Wilson Loops with Dirac Eigenmodes in Lattice QCD”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2016** (2016) 013B06 (15 pages). (査読有) DOI: 10.1093/ptep/ptv184
13. F. Okiharu, T. Doi, H. Ichie, H. Iida, N. Ishii, M. Oka, [H. Suganuma](#) and T.T. Takahashi,
“Tetraquark and Pentaquark Systems in Lattice QCD”, *Journal of Modern Physics* **7** (2016) 774-789.
(査読有、招待論文) DOI: 10.4236/jmp.2016.78072
14. S. Imai and [H. Suganuma](#), “Non-perturbative Analysis of Various Mass Generation by Gluonic Dressing Effect with the Schwinger-Dyson Formalism in QCD”, *Journal of Modern Physics* **7** (2016) 790-805. (査読有、招待論文) DOI: 10.4236/jmp.2016.78073
15. [H. Suganuma](#) and N. Sakumichi, “Perfect Abelian Dominance of Confinement in Quark-Antiquark Potential in SU(3) Lattice QCD”, *American Institute of Physics Conference Proceedings* **1701** (2016) 020016 (8 pages). (査読有) DOI: 10.1063/1.4938605
16. T. M. Doi, [H. Suganuma](#) and T. Iritani, “Lattice QCD Analysis for Relation between Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking”, *American Institute of Physics Conference Proceedings* **1701** (2016) 030004 (12 pages). (査読有) DOI: 10.1063/1.4938610
17. T. M. Doi, K. Redlich, C. Sasaki and [H. Suganuma](#), “Analytical Formulae linking Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking”, *European Physical Journal Web of Conferences* **126** (2016) 04016 (7 pages). (査読有) DOI: 10.1051/epjconf/201612604016
18. N. Sakumichi and [H. Suganuma](#), “Perfect Abelian Dominance of Confinement in Mesons and Baryons in SU(3) Lattice QCD” *European Physical Journal Web of Conferences* **126** (2016) 04042 (8 pages). (査読有) DOI: 10.1051/epjconf/201612604042

19. T. M. Doi, K. Redlich, C. Sasaki and H. Suganuma, “Dirac Spectrum Representation of Polyakov Loop Fluctuations in Lattice QCD”, Proceedings of Science (**Lattice 2015**) (2016) 315 (7 pages). (査読有) <https://pos.sissa.it/251/315/pdf>
20. H. Suganuma and N. Sakumichi, “The Three-Quark Potential and Perfect Abelian Dominance in SU(3) Lattice QCD” Proceedings of Science (**Lattice 2015**) (2016) 323 (7 pages). (査読有) <https://pos.sissa.it/251/323/pdf>
21. 菅沼秀夫, 「バリオン中のクォーク閉じ込め」『素粒子論研究』**22** (2016) 110-112. (査読無)
22. N. Sakumichi and H. Suganuma, “Three-Quark Potential and Abelian Dominance of Confinement in SU(3) QCD”, Physical Review **D92** (2015) 034511 (7 pages). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.034511
23. T. M. Doi, K. Redlich, C. Sasaki and H. Suganuma, “Polyakov Loop Fluctuations in the Dirac Eigenmode Expansion”, Physical Review **D92** (2015) 094004 (9 pages). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.094004

〔学会発表〕(計9件)うち 国際会議7件, 招待講演5件

1. H. Suganuma, “Non-abelian Higgs Theory in a Strong Magnetic Field and Confinement” Int. Conf. on “Quark Confinement and the Hadron Spectrum XIII”, Maynooth U., Ireland, 31 July - 6 Aug. 2018.
2. H. Suganuma, “Monopole Dominance of Confinement in SU(3) Lattice QCD” Int. Conference on “Quark Confinement and the Hadron Spectrum XIII”, Maynooth Univ., Ireland, 31 July - 6 Aug. 2018.
3. 菅沼秀夫 「強電磁場中での対称性の振る舞い」, 研究会「高密度クォーク・ハドロン物質と中性子星」, 京都大学, 2018年5月26日. (招待講演)
4. H. Suganuma, “Matter-Antimatter Coexistence Method for Finite Density QCD” International Workshop on “Excited QCD 2017”, Sintra, Portugal, 7-13 May 2017. (招待講演)
5. H. Suganuma, “Some Relations for Quark Confinement and Chiral Symmetry Breaking in QCD” International Conference on “Quark Confinement and the Hadron Spectrum XII”, Thessaloniki, Greece, 28 August - 3 September 2016. (招待講演)
6. H. Suganuma, “Holographic QCD for H-dibaryon (uuddss)” International Conference on “Quark Confinement and the Hadron Spectrum XII”, Thessaloniki, Greece, 28 August - 3 September 2016.
7. H. Suganuma, “Interplay between Deconfinement and Chiral Properties” International Conference on “Critical Point and Onset of Deconfinement 2016”, Wroclaw, Poland, 30 May - 4 June 2016. (招待講演)
8. H. Suganuma, “The Three-Quark Potential and Perfect Abelian Dominance in SU(3) Lattice QCD” 33rd International Symposium on “Lattice Field Theory”, Kobe, Japan, 14-18 July, 2015.
9. 菅沼秀夫 「バリオン中のクォーク閉じ込め」, 研究会「原子核・クォークと中性子星」, 京都大学, 2015年6月11日~13日. (招待講演)

〔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: researchmap と個人のウェブに、論文などの成果を公開している。

<https://researchmap.jp/read0069370> (researchmap 菅沼秀夫)

<http://suganuma-hideo.o.oo7.jp/hideo/> (Hideo Suganuma's webpage)

6. 研究組織 (1)研究分担者 なし (2)研究協力者 なし

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、研究者個人に帰属されます。