

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007~2010

課題番号：19540287

研究課題名 (和文) 量子色力学に基づくクォーク多体系の研究

研究課題名 (英文) Research of Multi-Quark Systems based on Quantum Chromodynamics

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：10291452

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)に基づき、非摂動的真空や核子・中間子などのハドロンに対して、クォーク・グルーオンのレベルから研究する。特に、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDにより、理論物理の重要課題である「カラーの閉じ込め」や、近年実験的に注目されている「エキゾチック・ハドロン」等のクォーク多体系の研究を行う。また、超弦理論に基づく新しい解析方法の「ホログラフィックQCD」等も用いて研究を進める。

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 the nonperturbative vacuum and hadrons such as nucleons and mesons in terms of quarks and gluons. In particular, we use lattice QCD, i.e., the first-principle calculation of the strong interaction, and study “color confinement” as an important subject in theoretical physics, and multi-quark systems like “exotic hadrons”, which are experimentally paid attention in recent years. We also use “holographic QCD”, a new analytical method based on the superstring theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子・原子核理論

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学，クォーク，グルーオン，格子ゲージ理論，カラーの閉じ込め，カイラル対称性，エキゾチック・ハドロン，超弦理論

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、その強結合性の為に、摂動論的手法は適用できず、また、真空そのものが相互作用の為にその性質を変えており、非常に複雑な構造を有している。従って、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ー”、“QCD相転移現象”等の、物理として興味ある非摂動的な現象が豊富に現れ、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、例えば、ミレニアム問題の1つとしてクレール数学研究所

から、その解明に対して100万ドルの懸賞金がか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、非相対論的クォーク模型、(非)線型シグマ模型、フラックス・チューブ模型、(カイラル)バグ模型、インスタントン液体模型、南部・ジョナラシニオ模型、双対超伝導模型等多くの模型や、カレント代数、強結合展開、 $1/N_c$ 展開、QCD和則等の理論が案出されそれぞれ一定の成果を挙げた。しかしながら、これらの模型の多くは、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からは程遠い理論から出発していたり、様々な近似を行な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る。

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、現状で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、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る。

最近、ウィッテンと酒井・杉本は、QCDに対する新たな解析方法として、超弦理論に現れるDブレーンを、コンパクト化された10次元空間上に適切に配置することによって、4次元のQCD等の非可換ゲージ理論を構成し、次いで、ゲージ/重力対応に基づいて、QCDの赤外有効理論を導出する方法を開発した。この方法は、「ホログラフィックQCD」と呼ばれ、QCDに対する新たな非摂動的解析方法として、超弦理論とQCDの両分野の研究者により盛んに研究され、1つの潮流になってきている。

実験的には、2003年にSPring-8のLEPS実験等で、ペンタクォーク(クォーク・反クォークの5体系)の候補である $\Theta^+(1530)$ の発見の報告を皮切りに、2004年、KEKのBelle実験やSLACのBaBar実験などで、 $X(3872)$ や $Y(3940)$ などのチャームクォークを含むテトラクォーク(クォーク・反クォークの4体系)やハイブリッド粒子(グルーオンを頭わに含むクォーク多体系)の候補が続々と発見され、クォーク多体系の物理が、実験・理論双方から注目されている。

これらの発見は、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、かつ、クォークの閉じ込め機構や、ハドロン内のクォーク・グルーオンの有効相互作用等の背後にある重要な情報を与えるものである。さらに、類似の状態を探索するとともに、その

構造と束縛のダイナミクスの解明が急がれる。この研究は、現在世界中の研究者の注目を集めており、現在、理論と実験の双方で様々な方面での研究が展開しつつある。

また、高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ相の生成実験は、BNLのRHICにおいて精力的に為され、有限温度でのQCD相転移の様々な特性が実験的に明らかになりつつあり、それに応じて、理論的にも有限温度QCD系の定量的な解明に対する重要度が増している。

2. 研究の目的

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・中間子を含むハドロンの、および、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理解することは、素粒子物理学と原子核物理学との空隙を埋める学問的にも重要なステップである。

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モンテカルロ計算を有用な研究手段として活用し、“カラーの閉じ込め現象”や“カイラル対称性の自発的破れ”といった、強い相互作用の重要な諸特性に対するクォーク・グルーオンという基本的階層からの解明を目的とした。更に、格子QCD計算の結果と、クォーク・ハドロン物理学において長年培われた解析的なアプローチであるクォーク模型などの様々なQCD有効模型等とを比較し、両者を融合させることで、クォーク・グルーオンのレベルでの、QCD真空の非摂動的構造やハドロンの性質の解明を目指した。

特に、近年、実験的にチャームクォークを含んだテトラクォークやハイブリッド粒子等のエキゾチック・ハドロンの発見が相次ぎ、クォーク多体系の性質の理論的解明はこの分野の重要な研究課題になっている。我々は、この状況に対応して、これ迄にもテトラクォーク、ペンタクォーク、ハイブリッド粒子、グルーボールなどのエキゾチック・ハドロンに対して、格子QCDやQCDの有効理論を用いた研究を世界に先駆けて行ってきたが、本研究課題では、基礎理論であるQCDに基づき、クォーク多体系の諸性質に関する更なる解明を目指した。

有限温度・有限密度のQCDも、クォーク・グルーオン・プラズマの物理と関連して重要な分野となっている。本研究課題では、格子QCDにより、有限温度でのQCD真空と、そこでのハドロンの素励起モードの変化の解明を目指した。更に、新たなQCDの非摂動的解析方法として最近注目されつつある“ホログラフィックQCD”を用いて、格子QCDによる研究が困難な“有限バリオン

ン密度QCD系”と有限密度QCD相転移の様相の解明を目指した。

3. 研究の方法

本研究が対象とする低エネルギー領域での量子色力学(QCD)およびクォーク・ハドロン物理学における理論的困難の起源は、主として、その強結合性に根ざした非摂動的性質に由来しており、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等、実に多彩な物理現象の宝庫にもなっている。

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実験的解析方法を中心的な研究手段として、低エネルギー領域でのQCD真空の非摂動的な構造やクォーク多体系を含むハドロン諸性質を、クォーク・グルーオンの階層から解明した。

この格子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)に近似し、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。そして、近年の大型計算機の目覚ましい発展により、確実に信頼できる結果を得ることができるようになっている。

本研究課題では、格子QCD計算で得られた様々な結果を、場の量子論の解析的なモデル計算と比較するなど、相補的に用いることで、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。また、近年新たな非摂動的解析方法として注目されつつある、超弦理論のDブレーンに基づく“ホログラフィックQCD”など新理論も積極的に研究に取り入れ、総合的に研究を進めた。

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“クォーク多体系の研究”“グルーオン自由度に対する定量的解析”“カラーの閉じ込めとその起源”“ホログラフィックQCDによるバリオンの研究”等の一連の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、研究成果はフィジカル・レビュー誌等の国際的な一流学術誌に掲載され、科研費期間内に招待講演を、国際会議で3回、物理学会の合同シンポジウムや国内研究会で5回行っている。主な成果は以下の通りである。

(1) ランダウ・ゲージなど適当なゲージの下、

格子QCDにおけるグルーオン自由度であ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って、QCDの個々の現象に対して“重要なスケール”(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。この方法をクォーク間ポテンシャル、ハドロン質量、カイラル対称性の自発的破れ等に適用しグルーオンの成分という新たな視点からの解析を行った。特に、“クォーク閉じ込め力の起源”が、グルーオンの1.5GeV以下の運動量成分にあることを世界で初めて定量的に示した。この研究成果は、国際的な一流学術誌のPhysical Review Letters等に掲載され、国際会議においても招待講演を行った。

(2) 格子QCDを用いたランダウ・ゲージでのグルーオン伝播関数の詳細な解析により、4次元ユークリッド座標空間でのグルーオン伝播関数が、ハドロンにとって重要なスケールである0.1~1fmでは、4次元の湯川型の伝播関数 $\exp(-mr)/r$ (r は4次元ユークリッド距離)で表されることを見出した。これを基に“グルーオンのスペクトル関数”の解析的な関数形を世界で初めて導出し、それが“ ∞ の留数を持つ正の極”と“負の値をとる領域”を持つ極めて特異なものである事を指摘した。湯川的なグルーオンの伝播は4次元では低次元的であり、その背後に非摂動的QCD真空がランダムなカラー磁場の系である事が関連している可能性を指摘した。この成果に関して国際会議で招待講演を行った。

(3) 近年実験的に発見されたダブルチャームバリオンの様に、2つの重いクォークと1つの軽いクォークからなる系に対するクォーク間ポテンシャルを世界で初めて格子QCDと解析的なモデル計算の双方を用いて明らかにし、バリオン中での2個のクォーク間の有効閉じ込め力が、もう1つのバレンス・クォークの動的な効果により減少する事等を示した。この研究成果に関して、共同研究者である大学院院生が国際会議で招待講演を行った。

(4) QCDにおける代表的なゲージであるランダウ・ゲージとクーロン・ゲージを、実数パラメータ λ で連続的に結びつける“一般化ランダウ・ゲージ(λ ゲージ)”を定式化し、クォーク間の“瞬間ポテンシャル”等に対する詳細な格子QCD研究を行った。瞬間閉じ込め力は、ランダウ・ゲージ近傍ではゼロであり、クーロン・ゲージ近傍では、静的な閉じ込め力の2倍以上になり、それらの間では連続的に変化する事等を示した。

(5) QCDとクォーク模型とを結びつける試みの一環として、クォーク模型を記述す

るQCDのゲージの候補として“ λ_c ゲージ”を提案した。このゲージでは、クォーク同士が瞬間的に物理的ポテンシャルで作用しあい、クォーク模型と類似の状況になること等を指摘した。

- (6) 超弦理論のDブレーンからゲージ・重力対応を用いて定式化されるホログラフィックQCDにおいてソリトン解として現れるバリオンとバリオン物質を世界で初めて定量的に研究し、高密度QCDの相転移が、この枠組みでは、“バリオン密度の非局在化”として起きる事等を示した。
- (7) ホログラフィックQCDと“隠れた局所対称性を持つ非線形シグマ模型”とを比較した。前者では、5次元目の非自明な曲率により ρ 中間子の運動項がヤン・ミルズ型からずれ、その結果、カイラル・ソリトンに対する ρ 中間子の影響が、定量的のみならず定性的(トポロジカル)に後者とは異なること等を示した。
- (8) 双対超伝導描像に基づいた格子QCDの解析から、バリオン中でのクォーク閉じ込め力とモノポール凝縮との密接な相関を定量的に明らかにした。
- (9) 格子QCDを用いて、ダイクォークを理想化した軽いスカラークォークおよびそれとクォークの束縛状態である「キメラ・ハドロン」の性質を定量的に調べ、スカラークォークが、量子補正により大きな質量を獲得する事を示した。
- (10) 非等方格子QCDを用いて、クォーク・グルーオン・プラズマのシグナルとしても重要な“有限温度でのチャーモニウム”に対する研究を行い、臨界温度以上でも J/Ψ などのチャーモニウムが“空間的に局在した状態”として生き残る事を示した。
- (11) 一定の強い(カラー)電場と(カラー)磁場が共存する系では、質量ゼロのフェルミオン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、この発散もそ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、対生成率の発散の起源がアノマリーにある事等を示した。
- (12) 継続的な研究成果であるが、高精度で詳細かつ系統的な格子QCD研究により、核子などの3クォーク系、及び、クォーク多体系におけるクォーク間ポテンシャルが“1グルーオン交換のクーロン・ポテンシャル”と“Y型ジャンクションを伴う線形の閉じ込めポテンシャル”の和で表され、クォーク多体系においても閉じ込め力に対しては“ストリング描像”が成立する事を世界で初めて定量的に示した。本研究の初期の成果は、格子QCDの教科書の1節

として取り上げられ、科研費期間内にも物理学会の合同シンポジウムや国内研究会、国際会議において招待講演を行っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計24件) うち査読有17件

- ①T. Iritani, H. Suganuma, Instantaneous interquark potential in generalized Landau gauge in SU(3) lattice QCD: A linkage between the Landau and the Coulomb gauges, Phys. Rev. D83 (2011) 054502 (1-14). 査読有
- ②H. Suganuma, T. Iritani, F. Okiharu, T.T. Takahashi, A. Yamamoto, Lattice QCD study for confinement in hadrons, AIP Conf. Proc. (2011) 7頁印刷中. 査読無
- ③Y. Hidaka, T. Iritani, H. Suganuma, Fast vacuum decay into quark pairs in strong color electric and magnetic fields, AIP Conf. Proc. (2011) 4頁印刷中. 査読無
- ④A. Yamamoto, H. Suganuma, Relevant gluonic energy scale of spontaneous chiral symmetry breaking from lattice QCD, Phys. Rev. D81 (2010) 014506 (1-6). 査読有
- ⑤H. Suganuma, T. Iritani, A. Yamamoto, H. Iida, Lattice QCD study for gluon propagator and gluon spectral function, PoS (LAT2010) (2010) 289 (1-7). 査読無
- ⑥T. Iritani, H. Suganuma, Lattice QCD analysis for instantaneous interquark potential in generalized Landau gauge, PoS (LAT2010) (2010) 277 (1-7). 査読無
- ⑦A. Yamamoto, H. Suganuma, Relevant momentum components of gluons for confinement and chiral symmetry breaking, PoS (LAT2010) (2010) 294 (1-7). 査読無
- ⑧T. Iritani, H. Suganuma, H. Iida, Gluon-propagator functional form in the Landau gauge in SU(3) lattice QCD: Yukawa-type gluon propagator and anomalous gluon spectral function, Phys. Rev. D80 (2009) 114505 (1-20). 査読有
- ⑨A. Yamamoto, H. Suganuma, Relevant energy scale of color confinement from lattice QCD,

- Phys. Rev. D79 (2009) 054504 (1-11).
査読有
- ⑩K. Nawa, H. Suganuma, T. Kojo,
Brane-induced Skyrmon on S^3 :
Baryonic matter in holographic QCD,
Phys. Rev. D79 (2009) 026005 (1-25).
査読有
- ⑪K. Nawa, A. Hosaka, H. Suganuma,
Skyrmions with holography and hidden
local symmetry,
Phys. Rev. D79 (2009) 126005 (1-7).
査読有
- ⑫H. Suganuma, T. Iritani, A. Yamamoto,
H. Iida,
Lattice QCD analysis for gluons,
PoS (QCD-TNT09) (2009) 044 (1-12).
査読無
- ⑬H. Suganuma, K. Nawa, T. Kojo,
Baryons and baryonic matter in
holographic QCD from superstring,
Nucl. Phys. Proc. Suppl. B186 (2009)
248-251. 査読無
- ⑭A. Yamamoto, H. Suganuma,
Lattice analysis for the energy scale of
QCD phenomena,
Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 241601 (1-4).
査読有
- ⑮A. Yamamoto, H. Suganuma, H. Iida,
Lattice QCD study of the heavy-heavy-
light quark potential,
Phys. Rev. D78 (2008) 014513 (1-10).
査読有
- ⑯A. Yamamoto, H. Suganuma,
Quark motional effects on the interquark
potential in baryons,
Phys. Rev. D77 (2008) 014036 (1-7).
査読有
- ⑰A. Yamamoto, H. Suganuma, H. Iida,
Heavy-heavy-light quark potential in
SU(3) lattice QCD,
Phys. Lett. B664 (2008) 129-132.
査読有
- ⑱H. Suganuma, A. Yamamoto, N. Sakumichi,
T. T. Takahashi, H. Iida, F. Okiharu,
Inter-quark potentials in baryons and
multi-quark systems in QCD,
Mod. Phys. Lett. A23 (2008) 2331-2339.
査読有
- ⑲H. Iida, T.T. Takahashi, H. Suganuma,
Properties of scalar-quark systems in
SU(3)_c lattice QCD,
Mod. Phys. Lett. A23 (2008) 2344-2347.
査読有
- ⑳K. Nawa, H. Suganuma, T. Kojo,
Baryons with holography,
Mod. Phys. Lett. A23 (2008) 2364-2367.
査読有
- ㉑H. Iida, T. Doi, N. Ishii, H. Suganuma,
K. Tsumura,
Survival of charmonia above T_c in
anisotropic lattice QCD,
Prog. Theor. Phys. Suppl. 174 (2008)
238-241. 査読有
- ㉒A. Yamamoto, H. Suganuma, H. Iida,
Heavy-heavy-light quark potential in
two approaches,
Prog. Theor. Phys. Suppl. 174 (2008)
270-273. 査読有
- ㉓K. Nawa, H. Suganuma, T. Kojo,
Baryonic matter in holographic QCD,
Prog. Theor. Phys. Suppl. 174 (2008)
347-352. 査読有
- ㉔H. Iida, N. Sakumichi, H. Suganuma,
Three-quark systems in MA and MC
projected QCD,
PoS (LAT2008) (2008) 254 (1-7). 査読無
- [学会発表] (計10件)のうち招待講演8件
- ①H. Suganuma,
Lattice QCD Study for Confinement in
Hadrons,
Int. Conf. on "Structure of Baryons"
(Baryons'10), 7-11 Dec. 2010, Osaka,
Japan. (招待講演)
- ②菅沼秀夫,
閉じ込めとカイラル対称性：
有効理論と格子QCDでの諸研究，
日本物理学会2010年秋季大会，合同シン
ポジウム(理論核物理領域・素粒子論領域)
「クォーク閉じ込めとカイラル対称性：
QCDの難問と多彩なアプローチの検討」，
2010年9月12日，九州工業大学。
(招待講演)
- ③H. Suganuma,
Lattice QCD Study for Gluon Propagator
and Gluon Spectral Function,
Int. Symp. on "Lattice Field Theory"
(Lattice 2010), 14-19 June 2010, Italy.
- ④菅沼秀夫,
格子QCDで探るクォーク多体系の物理，
研究会「ストレンジネスから新ハドロン
へ」，2009年12月11-12日，大阪大学
RCNP. (招待講演)
- ⑤菅沼秀夫,
格子QCDによるマルチクォーク系の動
力学，
新学術領域・キックオフ研究会「多彩なフ
レーバーで探る新しいハドロン存在形態
の包括的研究」，2009年11月27-28日，
名古屋大学. (招待講演)
- ⑥H. Suganuma,
Lattice QCD Analysis for Gluons,
Int. Workshop on "QCD Green's Functions,
Confinement, and Phenomenology"，

7-11 Sep. 2009, Trento, Italy.

(招待講演)

⑦菅沼秀夫,

格子QCDによるクォーク多体系の物理,
日本物理学会 第64回年会, 合同シンポジウム(理論核物理領域・実験核物理領域・素粒子実験領域・素粒子論領域)

「Multiquark hadrons probed by various flavors - Crossover of B-factory, LEPs and J-PARC」2009年3月30日, 立教大学.
(招待講演)

⑧H. Suganuma,

Baryons and Baryonic Matter in Holographic QCD from Superstring,
Int. Conf. on “Quantum Chromodynamics”
7-12 July 2008, Montpellier France.

⑨H. Suganuma,

Inter-Quark Potentials in Baryons and Multi-Quark Systems in QCD,
Int. Conf. on “Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics” (Chiral07),
13-16 Nov. 2007, Osaka, Japan. (招待講演)

⑩菅沼秀夫,

Lattice QCD Study for Exotic Hadrons,
研究会「Challenge to New Exotic Hadrons with Heavy Quarks」, 2007年7月7-8日,
大阪大学 RCNP. (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

<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: 10291452

(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: 20153314