SC-RABBIT グループ 実施報告書

研究組織

研究責任者:

菅沼 秀夫 (すがぬま ひでお)・京都大学・大学院理学研究科・助教授
[研究分担] プロジェクト全体の総指揮・物理的課題の案出・理論計算 等

共同研究者:

岡 真 (おか まこと)・東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
[研究分担] 物理的課題の案出・クォーク模型による計算及び比較

興治 文子 (おきはる ふみこ)・日本大学・理工学部・助手
[研究分担] ペンタクォーク、テトラクォーク関連の研究と数値計算の実行

土井 琢身 (どい たくみ)・理研ＢＮＬ・基礎科学特別研究員
[研究分担] クォーク・グルーオン混合凝縮関連の研究・数値計算の実行

高橋 徹 (たかはし とおる)・京都大学 基礎物理学研究所・学振特別研究員
[研究分担] ポテンシャル、ペンタクォーク関連の研究・数値計算の実行

石井 理修 (いしい のりよし)・東京工業大学 大学院理工学研究科・研究員
[研究分担] ペンタクォーク関連のプログラム作成・数値計算の実行

飯田 英明 (いいだ ひであき)・東京工業大学・大学院理工学研究科・博士課程３年
[研究分担] 有限温度ＱＣＤ、格子ＱＣＤと解析的な計算との比較

当該年度の実施報告の詳細

６年間の総合報告

本研究課題では、格子ＱＣＤモンテカルロ・シミュレーションを有益な手段として活用し、ＱＣＤ真空の非摂動的構造 及び ハドロンの諸性質の解明といった本来の理論物理学の諸問題を順次検討していくことで、『ＱＣＤに基づいたハドロン物理学』の構築を目指してきた。

尚、本研究課題が扱う低エネルギー領域でのＱＣＤ 及び ハドロン物理学における理論的困難の起源は、第一に、その強結合性に根ざした非摂動的性質に依拠しており、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、カイラル対称性の目発的破れ、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。

これら様々な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) バッグ模型、インスタントン液体型、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てきた。しかしながら、既述の模型の多くは、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からは程遠い地点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なものばかりである。

そこで、本研究課題では格子ＱＣＤという数値実験的解析手段を用いて、ハドロン物理学で理論的に提案されているが、まだ格子ＱＣＤの分野では余り知られていない重要な物理量の測定を可能なものから順次試みていき、その有益な by-product として、既述の多様な描像やそこでの近似の有効性を検討し、ＱＣＤやハドロンに対する妥当な物理的描像の選択とその理論の適用範囲の定量的な吟味等も試みてきた。

それと同時に、本研究課題では、ブルックヘブン米国国立研究所で進行中のＲＨＩＣプロジェクトを受け実験的にも重要性が増しつつある有限温度でのＱＣＤの物理にまで視野を広げて研究を行なってきた。この領域は、かつては 主として解析的な模型で盛んに研究され、現在では格子ＱＣＤシミュレーションでも精力的に研究されているが、その両者を比較しながら研究を進めてきた。

また、近年 ペンタクォーク、テトラクォーク等のエキゾチック・ハドロンの実験的な発見報告が相次ぎ、クォーク多体系の物理が、理論・実験の両面から非常に注目されてきた。こういった研究分野の潮流や実験サイドからの要請に即応す

る形で、本研究課題でも、研究対象を ペンタクォークやテトラクォークなどのクォーク多体系にまで拡げ、この方面の研究も 強力に推し進めてきた。

具体的には、以下に列挙する 数多くのクォーク・ハドロン物理の研究課題に対して、強い相互作用の第一原理計算である 格子ＱＣＤ等 を用いて、かなり徹底した研究を遂行してきた。

1. 格子ＱＣＤによる３クォーク系でのクォーク間ポテンシャルの研究
2. 格子ＱＣＤによるクォーク多体系でのクォーク間ポテンシャルの研究
3. 格子ＱＣＤによる３クォーク系でのグルーオン的な励起エネルギーの研究とクォーク模型の成功に対する物理的理由の解明
4. 非等方格子ＱＣＤを用いた負パリティ・バリオンの研究：フレーバー１重項バリオンに関する研究 と $\Lambda(1405)$ の物理的実態の解明
5. 非等方格子ＱＣＤによるハイブリッド境界条件を用いたペンタクォーク・バリオンの研究
6. 相関関数の対角化によるペンタクォーク・バリオンの格子ＱＣＤ研究
7. 非等方格子ＱＣＤによるテトラクォーク系の研究
8. 格子ＱＣＤを用いた双対超伝導描像に基く閉じ込め機構の研究
9. 格子ＱＣＤによる ゼロ温度 及び 有限温度でのクォーク・グルーオン混合凝縮 $g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G^{\mu\nu}q\rangle$ の研究
10. 非等方格子ＱＣＤによる有限温度でのグルーボールの研究
11. 非等方格子ＱＣＤによる有限温度でのチャーモニウムの研究
12. 非等方格子ＱＣＤにおける重クォーク作用の研究
13. 非等方格子ＱＣＤでの $O(a)$ 改良ウィルソン・クォーク作用の研究
14. 格子ＱＣＤのデータを用いた Schwinger-Dyson 方程式の積分核とカイラル対称性の自発的破れに対する研究

これらの研究成果は、３編の Physical Review Letters の論文をはじめ、３０編以上の査読論文を含む、総計９０編以上の英字の学術論文にまとめられ公表さ

れている。尚、これらの研究は、その多くが 世界に先駆けて初めて行なわれた研究であり、いずれも世界的なレベルで一定水準の評価を受けている。

とりわけ、「 3 クォーク系でのクォーク間ポテンシャルの研究 」については、他では真似できない程に徹底した解明を行ない、その結果、格子 QCD の最もポピュラーな教科書の 1 つである Heinz J. Rothe の "Lattice Gauge Theories" (World Scientific, 2005) の第 3 版に、 1 節を割いて取り上げられるなど、確立した高水準の研究成果として世界的にも注目されている。

この様に、本研究課題では、比較的少人数のグループであったにもかかわらず、かなりの研究成果をあげることができた。その意味で、この様な研究の機会を与えてくれたＫＥＫの大型シミュレーション研究の共同利用システムに改めて感謝したいと思う。

当該年度の研究成果

当該年度では、ペンタクォーク、テトラクォークに関連した物理を中心として、前年度からの継続研究である 3 クォーク・ポテンシャル、3 クォーク系でのグルーオン的な励起エネルギー、負パリティー・バリオン、有限温度でのグルーボールの諸性質、有限温度でのクォーク・グルーオン混合凝縮 等の研究を、クエンチ近似での格子ＱＣＤを用いて行なった。

ペンタクォークに関する詳細な研究からは、1.54GeV 付近の低エネルギー領域には 正パリティ状態は存在しないこと、及び、負パリティ状態の最低エネルギーは、核子と K 中間子の散乱状態であること、約 1.8GeV 付近に共鳴状態が存在すること 等の研究結果を得た。また、ペンタクォーク・ポテンシャルを 世界で初めて計算し、クォーク多体系においても フラックス・チューブ描像が成立することを示した。次いで、テトラクォーク・ポテンシャルに関する詳細な研究から、クォークの配置に応じて フラックスの組み換え現象である フリップ・フロップが起こることを示した。

バリオンの構造と深く関わる 3 クォーク・ポテンシャルに関しては、詳細な研究を遂行し、閉じ込めポテンシャルが Y 型であることを確定した。また、3 クォーク系でのグルーオン的な励起エネルギーを、世界で初めて数値的に評価し、それが 1GeV 程度と大きいことを示した。そして、この大きなグルーオン的励起エネルギーこそが、グルーオンの自由度を陽に含まないクォーク模型の成功の鍵となることを指摘した。

負パリティー・バリオンの研究からは、謎の多い粒子Λ (1405) の質量が、単純な 3 クォークのフレーバー 1 重項では再現できないことを示した。また、有限温

度でのグルーボールに関しては、最大エントロピー法 (MEM) を用いて解析も行ない、スカラー・グルーボールの臨界温度付近の崩壊幅の顕著な増加という理論的予測を得た。有限温度でのクォーク・グルーオン混合凝縮に関しても、世界で初めての計算を行ない、2 つの異なるカイラル秩序パラメータの臨界温度付近での一致した振る舞いを指摘した。

以上の研究は、主として ＫＥＫの HITACHI-SR8000 及び 大阪大学の NEC-SX5 という 2 つの大型計算機を用いて 組織的に行なわれたものであり、相互の研究は有機的に関連しあっている。ＫＥＫのプロジェクトとしては、主として、以下に列挙する [2]-[7] に関連した研究を行なった。

[1] 非等方格子ＱＣＤと Hybrid 境界条件を用いたペンタクォークの研究

ペンタクォークの候補である $\Theta^+(1540)$ に焦点を絞り、$J^P = 1/2^{\pm}$ 状態のクォーク 5 体系について非等方的格子ＱＣＤを用いた研究を行なった。$\Theta^+(1540)$ は K 中間子と核子 (KN) の閾値の 約 100 MeV 上に存在するため、KN の散乱状態の中に埋もれる形になる。従って、KN の散乱状態との重なりができるだけ小さくなるような non-KN 型の interpolating field を用いて研究を行なった。正パリティの 5 クォーク系については、その最低エネルギー状態は、カイラル外挿後で 2.25GeV と非常に重く、実験的に観測されている $\Theta^+(1540)$ と同定できないと結論した。一方、負パリティの 5 クォーク系については、1.75GeV と $\Theta^+(1540)$ に比較的近い値を得た。この状態が KN の散乱状態ではなくコンパクトな共鳴状態であることを確認する為の新しい方法として “hybrid boundary condition (HBC) ” を用いた解析方法を考案した。通常、格子ＱＣＤ計算においては、u, d, s クォーク全てにおいて 空間方向には周期的境界条件が用いられる。ここで導入する HBC では、空間的境界条件として、u, d クォークには反周期的、s クォークには周期的な条件を課す。u と d を偶数個含む共鳴状態 $\Theta^+(uudd\bar{s})$ は、HBC を課しても 全体として周期的境界条件に従うので、その効果をあまり受けないことが予想される。一方、$\mathrm{K}(u\bar{s},\, d\bar{s})$ や $\mathrm{N}(uud,\, udd)$ 等の u と d を奇数個含むハドロンは、HBC では 反周期的境界条件に従い、その結果 一辺 L の有限の立方体中においては最低でも $|\vec{p}_{\min}| = \sqrt{3}\pi/L$ の運動量を持つ。従って、HBC の下では、KN の散乱状態の閾値は $E_{\rm th} \simeq m_N + m_K$ から、$E_{\rm th} \simeq \sqrt{m_N^2 + \mathbf{p}_{\min}^2} + \sqrt{m_K^2 + \mathbf{p}_{\min}^2}$ に引き上げられる。格子の空間サイズが $L \sim 2$ fm の場合、HBC での閾値 $E_{\rm th}$ は周期的境界条件の場合に比べて 200 ~ 250MeV 上昇する。従って、境界条件を HBC に変化させたとき、注目する 5 クォーク状態がコンパクトな共鳴状態 Θ^+ であればそのエネルギーは変化せず、一方 NK 散乱状態であれば 200 ~ 250 MeV 上昇することになる。以上の考察を踏まえ、5 クォーク系に対して、HBC を課した格子ＱＣＤ計算を行なった。その結果、周期的境界条件で 1.75GeV 付近に現れる負パリティ

の 5 クォーク状態のエネルギーは、HBC では 閾値と連動して大きく変化し、その状態が コンパクトな共鳴状態 Θ^+ ではなく、NK の散乱状態であることが判明した。以上のことから、1.75GeV 以下の低エネルギー領域には、コンパクトな共鳴状態としての Θ^+ は現れないと結論づけた。

[2] 格子ＱＣＤによる相関行列の対角化によるペンタクォークの研究

$\Theta^+(1540)$ はＫＮの閾値よりも上であり、そのシグナルは NK 散乱状態のシグナルに埋もれる形となるので、適切に状態を分離せねばならない。また、個々のシグナルが共鳴状態のものなのか、単に散乱状態のものなのかを 区別することも必要である。これらを適切に行うには 比較的高い統計を要する。これまでの研究では、状態の適切な分離と その状態の識別が不十分であったと考えられる。そこで、$\Theta^+(1540)$ のシグナルを適切に分離するために、2 種類の独立な interpolating field を用意し、$(I, J) = (0, 1/2)$ のチャンネルについて 2×2 の相関行列を計算した。その相関行列を対角化することによって、適切に状態を分離し、lowest state, 2nd-lowest state のシグナルを得た。このとき、正確に分離するために、数千のゲージ配位を用意し 高統計計算を行った。また、得られたシグナルが共鳴状態のものなのか、散乱状態のものなのかを判別するために、エネルギーの体積依存性、及び、spectral weight の体積依存性を調べた。その結果、$(I, J^P) = (0, 1/2^-)$ のチャンネルの NK の閾値の少し上に共鳴状態と思われる状態を見いだした。この状態は、カイラル極限では 約 1.8GeV であり、$\Theta^+(1540)$ と比較すると やや重い。しかしながら、現状の計算は 格子間隔が比較的大きく、また、用いているクォーク質量が比較的重い、クエンチ近似を使用している、等の問題がある為、最終的に、この得られた共鳴状態が $\Theta^+(1540)$ に対応する状態なのかどうかを確認するためには、このチャンネルについての更なる計算が必要であり、現在進行中である。

[3] クォーク多体系 (ペンタクォーク・テトラクォーク) でのクォーク間力の研究

クォーク多体系におけるクォーク間力の解明は、ペンタクォーク系を含むクォーク多体系のダイナミックスを知る上で、基本的で重要な物理的意味を持つと位置付けられる。この様な視点から、我々は、世界に先駆けて、静的なペンタクォーク系におけるクォーク間力の研究を、格子ＱＣＤを用いて行ない、ペンタクォーク・ポテンシャルが、1 グルーオン交換での 2 体のクーロン・ポテンシャルとフラックス・チューブ描像での線形ポテンシャルの和で表されること等を示した。これは、ペンタクォーク系等のクォーク多体系においても フラックス・チューブ描像が成立することに対する、ＱＣＤからの証明であり、この事実に基いて、複

雑なクォーク多体系に対する適切なクォーク模型ハミルトニアンをＱＣＤから与えた。次いで、テトラクォーク・ポテンシャルに関する詳細な研究から、クォークの配置に応じて フラックスの組み換え現象である フリップ・フロップが起こることを示した。また、ペンタクォーク系、テトラクォーク系における閉じ込め力が、Q-$\bar{\text{Q}}$ 系 や ３Ｑ系 における閉じ込め力と ほぼ一致していることを明らかにし、通常のメソン・バリオンのみならず、クォーク多体系においても閉じ込め力の普遍性が成立することを ＱＣＤに基いて数値的に証明した。以上の結論は、フラックス・チューブ形成によるクォークの閉じ込め機構という描像を強く支持している。

[4] バリオン的な３クォーク・ポテンシャル (基本的な３体力) の研究

自然界に現れる３体力の殆どは高次補正に過ぎないのに対して、ＱＣＤにおいては、３クォーク・ポテンシャルは、ＱＣＤのカラー $\mathrm{SU}(3)$ の構造に根ざした基本的な物理量であり、かつ、核子などバリオンの性質と密接に関連する重要な物理量である。この３クォーク・ポテンシャルは、また、現象論的にかなりの成功を収めている非相対論的クォーク模型等におけるインプットとしても、フラックス・チューブ描像の妥当性を吟味する上でも、クォーク・ハドロンの物理においては非常に重要な物理量である。しかし、これ迄、メソン的な Q-$\bar{\mathrm{Q}}$ ポテンシャルの研究が、格子ＱＣＤを用いて 精力的かつ系統的に為されているのとは対照的に、３クォーク・ポテンシャルに対しては、これ迄 格子ＱＣＤを用いての研究は皆無であった。我々は、世界で初めて、格子ＱＣＤによる ３クォーク・ポテンシャルの詳細な計算を、３００以上もの異なる３クォーク系に対して実行し、その解析的な表式を特定し、３クォーク間に Ｙ型のカラー・フラックス・チューブが張られるという物理的描像を得た。この結論は、核子などのバリオンにおけるクォークの閉じ込めがどのような形で為されるかという点でも重要であり、世界的にも注目されている。

[5] ３クォーク系でのグルーオン的な励起エネルギーの研究 ~ クォーク模型に対するＱＣＤからの基礎づけの試み

ＱＣＤが、クォークとグルーオンの自由度で記述されているにもかかわらず、グルーオンの自由度を陽に含まないクォーク模型が、ハドロンの分類に対してかなりの成功している事実は、ハドロン物理における大きな謎の１つである。実際、ハドロンの低励起状態の多くは、クォーク的な励起で説明できてしまい、グルーオン的な自由度は陽には現れないように見える。我々は、３クォーク系でのグルーオン的な励起エネルギーを、世界で初めて数値的に評価し、それが $1\mathrm{GeV}$ 程度と

かなり大きいことを明らかにした。そして、この大きなグルーオン的励起エネルギーこそが、低励起のハドロンに対するクォーク模型の成功を保証すること、及び、ハイブリッド・バリオンが、1GeV 以上の励起状態として出現することを示した。また、グルーオン的な励起エネルギーの関数形を特定し、バリオンにおけるグルーオン的な励起がバリオン全体が関与する複雑な励起モードであることを明らかにした。

[6] 非等方格子ＱＣＤを用いた、負パリティー・バリオンの研究 ~ バリオンのフレーバー 1 重項に関する研究 と $\Lambda(1405)$ に対する物理的な理解

我々は、虚時間方向のメッシュが細かい非等方格子を用いて クエンチ近似での $\mathrm{SU}(3)$ 格子ＱＣＤ計算を実行し、メソン、バリオン、グルーボールといったハドロンの質量計算を系統的に研究した。擬スカラーとベクトルのメソン 8 重項、正パリティ・バリオンの 8 重項と１０重項、負パリティ・バリオンの 8 重項、１０重項、1 重項といった広範囲なハドロンについて、クォークの質量 (ホッピング・パラメーター) を様々に変えた数値計算を実行した。とりわけ、$\Lambda(1405)$ は、ストレンジネスを有するにもかかわらず、最も軽い負パリティー・バリオンであり、その正体についても、クォーク模型では、Jaffe が予言した $B = 2$ の H 粒子と同様、フレーバー $\mathrm{SU}(3)$ の 1 重項に分類される粒子であるが、$N\bar{K}$ という束縛状態であるという説もあり、ハドロン物理、特にストレンジネスの物理において、謎の粒子として、理論・実験の両面から注目されている。我々は、フレーバー 1 重項の 3 クォーク系に関しても クエンチ近似での格子ＱＣＤ計算を行なった。その結果、フレーバー 1 重項は $1700\ \mathrm{MeV}$ 以上と大質量であり、これを $\Lambda(1405)$ に同定することは困難であることを示した。このことから、$\Lambda(1405)$ が、$N\bar{K}$ という 2 つのハドロンの分子状態として、自然界でもユニークな物理的存在である可能性が濃厚になった。

[7] 有限温度でのグルーボールの研究

グルーボールは、ＱＣＤが理論的に予言する粒子であり、特に、スカラー・グルーボールは、電弱統一理論でのヒッグス粒子と同様に、真空と深く関連する素励起であり、かつトレース・アノマリーを通じての QCD のスケール不変性の破れと関わる粒子として、現在、理論・実験の両面から精力的に研究されている。我々は、このスカラー・グルーボールに焦点を当てて、非等方の格子ＱＣＤを用いて、有限温度でのグルーボールに関する極めて精密な計算を世界で初めて行なった。当該年度の研究では、最大エントロピー法 (MEM) を用いた解析も行ない、有限温度での変化が、スカラー・グルーボールの場合には、他のハドロンに比べて極

めて大きく、ＱＣＤ相転移温度以下の近傍で、300MeV 程度という顕著な崩壊幅の増大を示すことを指摘した。

[8] クォーク・グルーオン混合凝縮の研究

クォーク・グルーオン混合凝縮 $g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G^{\mu\nu}q\rangle$ は、質量次元 5 の operator の真空期待値であり、演算子積展開においては、クォーク凝縮 $\langle\bar{q}q\rangle$、グルーオン凝縮 $\langle G^a_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_a\rangle$ に次いで重要になる物理量であり、かつ、カイラル対称性の自発的破れに対する order parameter でもある。また、ＱＣＤ真空中のクォークとグルーオンの相関の強さを示すという点でも重要な量である。我々は、Kogut-Susskind フェルミオンを用いた格子ＱＣＤを用いて、ゼロ温度系 及び 有限温度系でのクォーク・グルーオン混合凝縮に対する詳細な計算を、世界で初めて行なった。その結果、$g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G^{\mu\nu}q\rangle/\langle\bar{q}q\rangle \simeq 2.5\mathrm{GeV}^2$ と、クォーク・グルーオン混合凝縮が大きな値を持つことを示し、ＱＣＤ和則等に大きく寄与することを示唆した。また、有限温度系では、カイラル対称性の回復に対応して、クォーク・グルーオン混合凝縮も 消失していくことを示した。その際、相転移温度付近も含めて、$g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G^{\mu\nu}q\rangle$ と $\langle\bar{q}q\rangle$ という 2 つの異なるカイラル秩序パラメータの一致した振る舞いを示し、この事実に基いて ＱＣＤ相転移の様相を考察した。

2005 年度研究発表リスト

口頭研究発表 (国際会議のみを掲載。括弧内は共同研究者)

1. H. Suganuma (H. Ichie, F. Okiharu, T.T. Takahashi)
   Lattice QCD Study for Confinement and Hadrons
   Int. Conf. on "High Energy and Mathematical Physics",
   Cadi Ayyad Univ. Marrakech, Morocco, April 4-7, 2005.

2. T.T. Takahashi (T. Umeda, T. Onogi, T. Kunihiro)
   Search for the S=+1 pentaquarks in quenched lattice QCD
   XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005),
   Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005.

3. F. Okiharu (T. Doi, H. Ichie, H. Iida, N. Ishii, M. Oka, H. Suganuma, T.T. Takahashi)

Tetraquark and Pentaquark Systems in Lattice QCD
Int. Workshop on "Quark Nuclear Physics 2005 (QNP05)",
Phoenix Park, Korea, February 22-24, 2005.

尚、以下の国際会議での研究発表は、ＫＥＫでの大型計算機プロジェクトの外縁部を構成する密接に関連した成果なので、ここに付記しておく。

4. T. Doi (N. Ishii, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma)
   Anisotropic Lattice QCD Study of Pentaquark Baryons in Spin 3/2 Channel
   XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005),
   Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005.

5. H. Suganuma (K. Tsumura, N. Ishii, F. Okiharu)
   Lattice QCD Evidence for Exotic Tetraquark Resonance
   XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005),
   Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005.

6. H. Iida (N. Ishii, T. Doi, H. Suganuma)
   J/Ψ at High Temperatures in Anisotropic Lattice QCD
   XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005),
   Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005.

7. N. Ishii (T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma, K. Tsumura)
   Anisotropic Lattice QCD Studies of Penta-Quarks and Tetra-Quarks
   Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
   Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005.

8. F. Okiharu (H. Suganuma, T.T. Takahashi, T. Doi)
   Multi-Quarks and Two-Baryon Interaction in Lattice QCD
   Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
   Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005.

9. T.T. Takahashi (T. Doi, H. Suganuma)
   Nuclear force in Lattice QCD
   Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
   Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005.

10. T. Doi (T.T. Takahashi, H. Suganuma)
Meson-Meson and Meson-Baryon Interactions in Lattice QCD
Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005.

査読つきの学術論文

1. F. Okiharu, H. Suganuma and T.T. Takahashi,
Study for the Pentaquark Potential in SU(3) Lattice QCD
Physical Review Letters **94** (2005) 192001 (4 pages).

2. T.T. Takahashi, T. Umeda, T. Onogi and T. Kunihiro,
Search for the Possible S=+1 Pentaquark States in Quenched Lattice QCD
Physical Review **D71** (2005) 114509 (18 pages).

3. F. Okiharu, H. Suganuma and T.T. Takahashi,
Detailed Analysis of the Tetraquark Potential and Flip Flop in SU(3) Lattice QCD
Physical Review **D72** (2005) 014505 (17 pages).

4. H. Suganuma, F. Okiharu, T.T. Takahashi and H. Ichie,
Role of Large Gluonic Excitation Energy for Narrow Width of Penta-Quark Baryons in QCD String Theory
Nuclear Physics **A755** (2005) 399-402.

尚、以下の査読論文は、ＫＥＫでの大型計算機プロジェクトの外縁部を構成する密接に関連した成果なので、ここに付記しておく。

5. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu and H. Suganuma,
Penta-Quark Baryon in Anisotropic Lattice QCD
Physical Review **D71** (2005) 034001 (11 pages).

6. N. Ishii, T. Doi, Y. Nemoto, M. Oka and H. Suganuma,
Spin 3/2 Pentaquarks in Anisotropic Lattice QCD
Physical Review **D72** (2005) 034001 (15 pages).

7. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu and H. Suganuma,
   Penta-Quark in Anisotropic Lattice QCD
   Nuclear Physics **A755** (2005) 467-470.

8. H. Iida, M. Oka and H. Suganuma,
   Dynamical Chiral-Symmetry Breaking at $T = 0$ and $T \neq 0$ in the Schwinger-Dyson Equation with Lattice QCD Data
   European Physical Journal **A23** (2005) 305-315.

国際会議プロシーディングス論文

Invited papers

1. H. Suganuma, T.T. Takahashi, F. Okiharu and H. Ichie,
   Lattice QCD Study for the Interquark Force in Three-Quark and Multi-Quark Systems
   Int. Conf. on "Quark Confinement and the Hadron Spectrum VI",
   Sardinia, Italy, Sept. 21-25, 2004,
   AIP Conference Proceedings **CP756** (2005) 123-132.

2. H. Suganuma, T.T. Takahashi, F. Okiharu and H. Ichie,
   Study of Quark Confinement in Baryons with Lattice QCD
   Int. Workshop on "QCD Down Under",
   Barossa Valley and Adelaide, Australia, March 10-19, 2004,
   Nuclear Physics **B** (Proc. Suppl.) **141** (2005) 92-98.

3. H. Suganuma, H. Ichie, F. Okiharu and T.T. Takahashi,
   Lattice QCD Study for Confinement and Hadrons
   Int. Conf. on "High Energy and Mathematical Physics",
   Cadi Ayyad Univ. Marrakech, Morocco, April 4-7, 2005,
   (Moroccan Publisher, 2005) 13 pages.

Contributed papers

4. T.T. Takahashi, T. Umeda, T. Onogi and T. Kunihiro,
Search for the S=+1 pentaquarks in quenched lattice QCD
XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005),
Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005.
Proceedings of Science (LAT2005) **071** (6 pages).

5. T.T. Takahashi, T. Umeda, T. Onogi and T. Kunihiro,
Lattice QCD Study of the Pentaquark Baryons
Int. Workshop on "Pentaquark04", SPring-8, July 20-23, 2004,
(World Scientific, 2005) 324-330.

6. F. Okiharu, H. Suganuma and T.T. Takahashi,
The Static Penta-Quark Potential in Lattice QCD
Int. Workshop on "Pentaquark04", SPring-8, July 20-23, 2004,
(World Scientific, 2005) 339-343.

7. H. Suganuma, H. Ichie, F. Okiharu and T.T. Takahashi,
Narrow Width of Penta-Quark Baryons in QCD String Theory
Int. Workshop on "Pentaquark04", SPring-8, July 20-23, 2004,
(World Scientific, 2005) 414-421.

8. 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
Int. Workshop on "Quark Nuclear Physics 2005 (QNP05)",
Phoenix Park, Korea, February 22-24, 2005, edited by J.K. Ahn *et al.*, 22 pages.

尚、以下の国際会議プロシーディングス論文は、ＫＥＫでの大型計算機プロジェクトの外縁部を構成する密接に関連した成果なので、ここに付記しておく。

9. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu and H. Suganuma,
Penta-Quark Anti-Decuplet in Anisotropic Lattice QCD
Nuclear Physics **B** (Proc. Suppl.) **140** (2005) 269-271.

10. T. Doi, N. Ishii, M. Oka and H. Suganuma,
The Lattice QCD Simulation of the Quark-Gluon Mixed Condensate $g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G_{\mu\nu}q\rangle$ at Finite Temperature and the Phase Transition

of QCD
Nuclear Physics **B** (Proc. Suppl.) **140** (2005) 559-561.

11. H. Iida, M. Oka and H. Suganuma,
Lattice-QCD based Schwinger-Dyson Approach for Chiral Phase Transition
Nuclear Physics **B** (Proc. Suppl.) **141** (2005) 191-195.

12. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu and H. Suganuma,
Anisotropic Lattice QCD Studies of Penta-Quark Anti-Decuplet
Int. Workshop on "Pentaquark04", SPring-8, July 20-23, 2004,
(World Scientific, 2005) 316-323.

13. H. Suganuma, K. Tsumura, N. Ishii and F. Okiharu,
Lattice QCD Evidence for Exotic Tetraquark Resonance
XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005)
Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005
Proceedings of Science (LAT2005) **070** (6 pages).

14. H. Iida, N. Ishii, T. Doi and H. Suganuma,
J/Psi at High Temperatures in Anisotropic Lattice QCD
XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005)
Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005
Proceedings of Science (LAT2005) 184 (6 pages).

15. T. Doi, N. Ishii, Y. Nemoto, M. Oka and H. Suganuma,
Anisotropic Lattice QCD Study of Pentaquark Baryons in Spin 3/2 Channel
XXIIIrd Int. Symp. on "Lattice Field Theory" (Lattice 2005)
Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005
Proceedings of Science (LAT2005) 064 (6 pages).

16. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma and K. Tsumura
Anisotropic Lattice QCD Studies of Penta-Quarks and Tetra-Quarks
Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005,
AIP Conf. Proc. (2006), hep-lat/0601003.

17. F. Okiharu, H. Suganuma, T.T. Takahashi and T. Doi
Multi-Quarks and Two-Baryon Interaction in Lattice QCD
Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005,
AIP Conf. Proc. (2006), hep-lat/0601005.

18. T.T. Takahashi, T. Doi and H. Suganuma,
Nuclear force in Lattice QCD
Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005,
AIP Conf. Proc. (2006), hep-lat/0601006.

19. T. Doi, T.T. Takahashi and H. Suganuma
Meson-Meson and Meson-Baryon Interactions in Lattice QCD
Particles and Nuclei International Conference (PANIC'05),
Santa Fe, New Mexico, Oct. 24-28, 2005,
AIP Conf. Proc. (2006), hep-lat/0601008.

投稿中の論文

1. H. Iida, T. Doi, N. Ishii, H. Suganuma and K. Tsumura,
Charmonium Properties in Deconfinement Phase in Anisotropic Lattice QCD
submitted to Physical Review **D**.