

# 研究活動

## 1. 素粒子理論グループ

教授 青木 慎也、石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至

助教授 石塚 成人、吉江 友照

講師 藏増 嘉伸

助手 佐藤 勇二、谷口 祐介、毛利 健司、Oliver Bär

研究機関研究員 石川 智己

研究生 (2名)

大学院生 (21名)

### 【人事異動】

岩崎 洋一 教授が2004年4月1日に筑波大学学長に就任した。佐藤 勇二助手が、文部科学省海外先進教育研究実践支援プログラムにより、2005年1月30日から約1年間、英国ロンドン大学インペリアル校に派遣された。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論の研究と超弦理論の研究を二本の柱に、活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループでは、計算科学研究センター<sup>1</sup>と密接な連携のもと、格子 QCD の大型数値シミュレーションが推進された。特に、u, d クォークと s クォークを正確に取り入れた  $N_f = 3$  QCD の大規模シミュレーションを行った。この研究には膨大な計算量が要求されるため、計算物理学研究センターの超並列計算機 CP-PACS、そのフロント計算機システム SR-8000 だけでなく、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の並列計算機 SR-8000、筑波大学学術情報処理センターの並列計算機 VPP-5000、地球シミュレーションセンターの地球シミュレータなど、使える計算機資源を集約して、プロジェクトを進めている。また、これと並行して、非摂動的な繰り込み係数や改良係数の研究、格子上での重いクォークの定式化とその応用、ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れを取り入れたカイラル摂動論の研究、なども推進した。

超弦理論の分野では弦理論の行列模型を用いた解析と、超弦理論とゲージ理論との対応という2つの関連するテーマを中心として研究が行われた。最近この分野においては、D-ブレーンと呼ばれるソリトン解の研究を通じて、弦理論の非摂動的定式化としての行列模型や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされたり、非臨界弦の理論における D-ブレーンの意味が明らかになったり等の大きな発展があった。この状況の

<sup>1</sup>筑波大学計算物理学研究センターは、2004年4月に「計算科学研究センター」に拡充・改組された。素粒子宇宙分野と超高速計算システム分野に加えて、物質生命分野、地球生物環境分野、計算情報学分野が強化・新設された。計算科学研究センターも計算物理学研究センターと同じく全国共同利用施設である。

下で、非臨界弦の非摂動効果、弦理論/スピン鎖対応、超弦理論と非可換性等についての研究を行った。

## 【1】 格子場の理論

(青木 慎也、宇川 彰、金谷 和至、石塚 成人、吉江 友照、藏増 嘉伸、谷口 裕介、Oliver Bär、石川 智己)

### (1) $N_f = 2 + 1$ QCD: 動的な strange クォークを含むシミュレーション

陽子や中性子などのハドロンの性質を、格子QCDから直接計算することは、クォーク質量などの自然界の基本パラメータの精密決定や、宇宙進化に決定的な影響を与えるCPの破れや高温のクォーク物質を解明するうえで、きわめて重要である。クォークのシミュレーションには膨大な計算量が要求されるため、これまでの大規模計算の多くでは、最も軽い up, down クォークの動的効果は取り入れるが、その次に重い strange クォークについては対生成・対消滅を無視したクエンチ近似が用いられていた ( $N_f = 2$  QCD)。しかし、strange クォークも、質量が QCD の典型的エネルギースケール程度であるので、有意な効果があると考えられる。(他方、strange より重いクォークの対生成・対消滅は重要ではない。) 従って、現実的なクォークとグルオンのシミュレーションに向けての最後のステップとして、動的な strange クォークを導入した格子 QCD のシミュレーションを行い、strange クォークの効果を評価することが重要である。そこで格子場の理論グループでは、up と down は縮退している近似で動的な strange クォークを取り入れた " $N_f = 2 + 1$  QCD" の系統的シミュレーションを行っている。プロジェクトの目標は、 $N_f = 2 + 1$  QCD の連続極限外挿を実行することにより、格子 QCD に残された最後の大きな近似を取り除いた完全に現実的なシミュレーションを初めて実現することにある。

$N_f = 2$  QCD では、Wilson 型格子クォークを使えば、厳密なシミュレーションアルゴリズムである Hybrid Monte Carlo (HMC) アルゴリズムが有効だが、 $N_f$  が奇数の場合はこの方法を単純に適用することができない。我々は、 $N_f$  が奇数の場合のアルゴリズムとして提唱されていた Polynomial HMC (PHMC) アルゴリズムを Wilson 型格子クォークで実用的な段階にまで整備した。それを受けて、PHMC を用いた  $N_f = 2 + 1$  QCD の試験研究を行い、現状の計算機的能力で連続極限外挿を行うためには、格子作用の改良が重要であるとの結果を得た(論文20、本論文準備中)。そこで、我々はゲージ作用として Iwasaki 改良作用を採用する。さらに、 $N_f = 3$  QCD におけるクォーク作用の改良パラメータの非摂動論的な決定を、ゲージ作用が plaquette 作用の場合(論文12)と Iwasaki 作用の場合(本論文準備中)で行った。これらの準備研究に基づき、大規模シミュレーションを開始した(論文19)。物理と計算コストの両側面から計画を練り、我々が採用したシミュレーション・パラメータは次の通りである。

- 格子間隔 :  $a \simeq 0.122, 0.10, 0.07$  fm の 3 点
- 物理的体積 :  $L^3 \simeq (2.0 \text{ fm})^3$  固定
- up, down クォーク質量 :  $m_{PS}/m_V \simeq 0.6 - 0.78$  の範囲で 5 点

- strange クォーク質量 :  $m_{PS}/m_V \simeq 0.7$  の周りで 2 点

ここで、 $m_{PS}, m_V$  はそれぞれ擬スカラー中間子とベクトル中間子の質量を表す。有限サイズ効果は中間子に関しては有意な影響を及ぼさないことを確認した。現在までに  $a \simeq 0.122, 0.10$  fm についてはゲージ配位の生成が終了し、 $a \simeq 0.07$  fm では生成を継続中で、ゲージ配位生成に関しては 2005 年度中に終了する見込みである。

ゲージ配位生成と並行して、中間子質量スペクトルとクォーク質量について解析を行い、 $a \simeq 0.122, 0.10$  fm のデータを使って連続極限を取った。我々が採用した作用は完全に  $O(a)$  改良がなされているので連続極限への外挿で  $a^2$  でスケールすると仮定している。(正確にはカレントの  $O(a)$  改良係数や繰り込み因子は摂動論で計算されていて、クォーク質量に関しては  $O(a)$  の寄与は残っている。しかし、ここではその寄与は小さいと仮定した。厳密な解析には格子間隔 3 点以上のデータが必要である。) 軽い中間子質量スペクトルに関しては、現在のところ連続極限での統計誤差が大きいものの実験値を再現している (図 1)。クォーク質量に関しては、これも連続極限での統計誤差が大きいだが、 $N_f = 2$  のときと同程度の値となっている (図 2)。最終的な解析結果は  $a \simeq 0.07$  fm でのデータを待たねばならないが、中間子質量スペクトルが実験値を再現できていることは、我々のプロジェクトが正しく遂行できていることを示すものである。

我々が生成した  $N_f = 2 + 1$  のゲージ配位上で扱うべき物理は多岐にわたるが、特に  $\eta'$  中間子の質量計算は重要である。これは、素粒子物理学での重要問題の一つである  $U(1)$  問題に付随したもので、フレーバー 1 重項中間子である  $\eta'$  がフレーバー 8 重項中間子より非常に重いことをどう説明するかという問題である。 $\eta'$  については strange クォークの動的効果が非常に効く可能性があり、現在その計算のための準備を進めている。その他、 $N_f = 2 + 1$  のゲージ配位上での重いクォークの物理に関しても計画中である。

## (2) カイラル外挿の研究：ウィルソン型クォークのカイラル摂動論

格子 QCD では、クォークが軽くなると計算量がクォーク質量に逆比例して増大するため、これまで主にクォーク質量 50 MeV 程度以上しか計算されていなかった。これを現実の軽いクォークの質量である 3~4 MeV までカイラル外挿しなければならないことが、現在の格子計算における大きな系統誤差の要因となっている。

我々は、連続極限を取れるぎりぎりの粗い格子で、クォーク質量を約 15 MeV までの  $N_f = 2$  QCD シミュレーションを実行した。クォークを軽くしてゆくと、クォーク行列の逆行列計算アルゴリズムと、配位更新に使われている Hybrid Monte Carlo (HMC) アルゴリズムの分子動力学発展部分に、不安定性が現れることがわかった。前者については、BiCGStab(L) 法を応用することである程度対応できるが、後者については、現状では分子動力学発展のステップサイズを細かくするしか対処法がなく、軽いクォークの計算時間が当初の予想よりも大きくなることが判明した。

シミュレーションの結果、以前の 50 MeV 以上のクォーク質量からの外挿からずれてはいるが、連続時空のカイラル摂動論から予想されている特異的なクォーク質量依存性は、15 MeV までクォーク質量を下げて、明確には現れないことを示した。

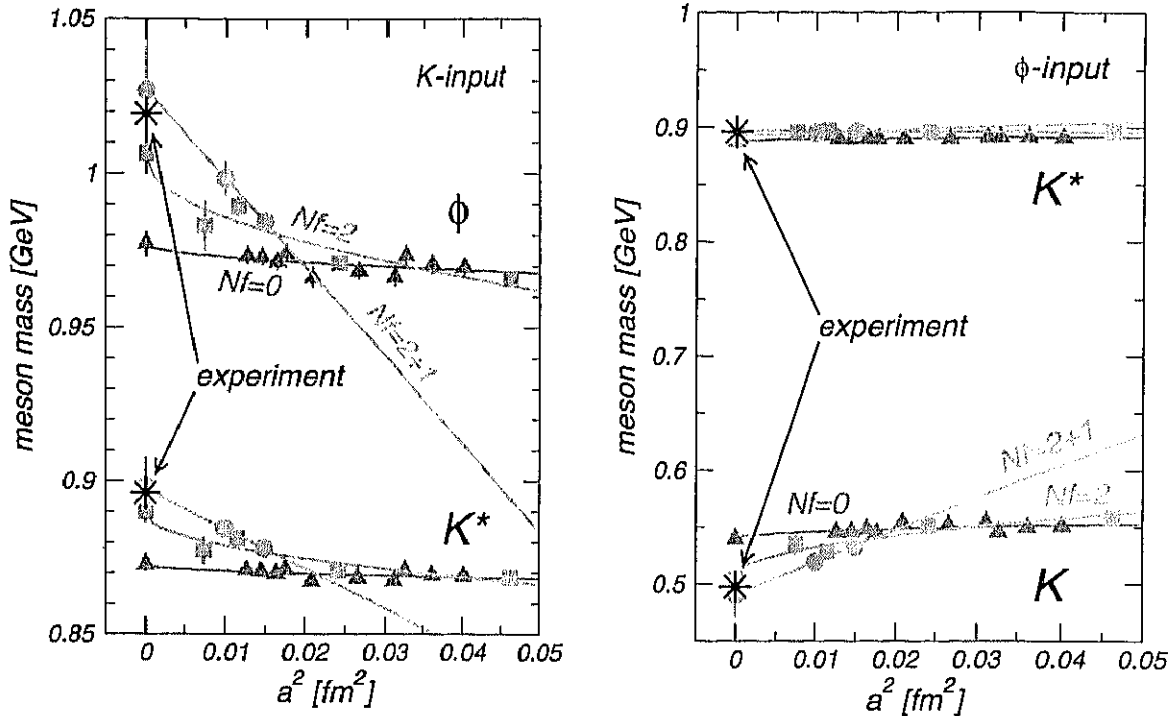


図 1: 軽い中間子質量スペクトルの連続極限への外挿。青○が  $N_f = 2+1$  の値。比較のため  $N_f = 2$  (黄□) とクエンチ近似 (茶△) の値も図示した。K-input、 $\phi$ -input は物理点を決定するときの入力としてそれぞれ K 中間子、 $\phi$  中間子を使ったことを意味する。 $N_f = 2+1$  の中間子質量スペクトルは連続極限で実験値を再現する。

他方、格子クォークは格子化によるカイラル対称性の陽な破れがあり、有限な格子上ではカイラル摂動論に大きな補正が入ると考えられる。そこで、ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れを取り入れたカイラル摂動論を定式化し、その 1 ループのクォーク質量依存性により、15MeV から 200MeV 程度までの全領域の格子データをよく説明できることを示した (論文 6)。

### (3) twisted mass QCD による ウィルソン型クォークのカイラル摂動論の研究

ウィルソン型クォークの変形として、カイラル領域の性質を改善した twisted mass クォークが提案され、クォークが軽い領域を研究する有望な方法として注目を集めている。上記の、ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れを取り入れたカイラル摂動論の方法を twisted mass QCD に適用し、その  $O(a)$  改良の振舞いを議論した (論文 10)。

### (4) 新しく提案した重いクォークに対する格子作用の研究

重いクォークを現在シミュレーションで用いられている程度の格子間隔で格子化すると格子化誤差が大きく、実用的でない。青木、藏増らは、格子理論の改良を行うことにより、格子上で重いクォークを取り扱うための新しい格子作用を提唱した。この作用を用いて、軽いクォークがドメインウォール・クォークの場合に軸性カレントの改良係数を摂動の 1 ループまでで決定した (論文 13,15)。

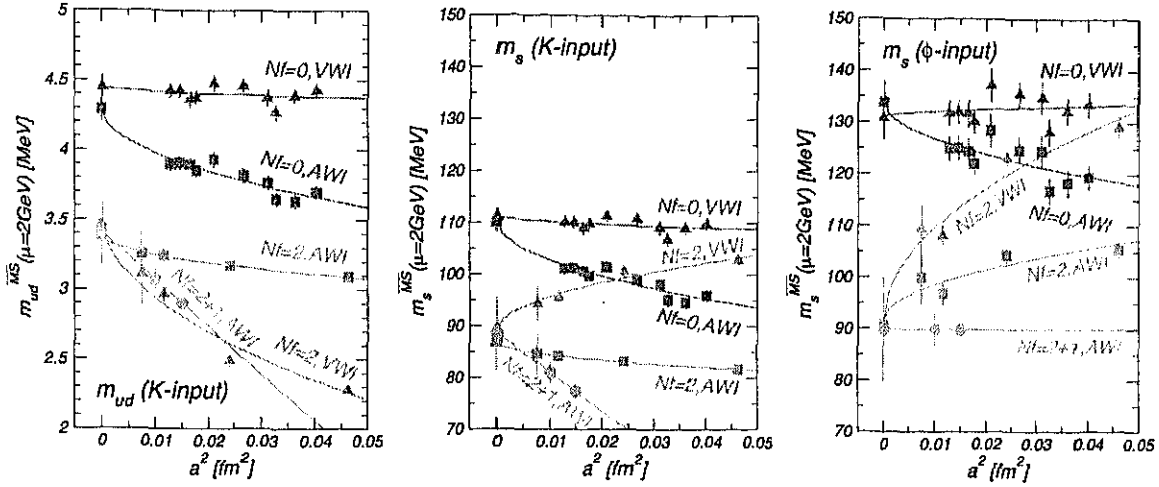


図 2: 軽いクォークの質量の連続極限への外挿。左が up と down クォーク (K-input)、中央が strange クォーク (K-input)、右が strange クォーク ( $\phi$ -input)。くり込みスキームは  $\overline{MS}$  ( $\mu = 2 \text{ GeV}$ )。青○が  $N_f = 2 + 1$  の値。比較のため  $N_f = 2$  (黄) とクエンチ近似 (茶) の値も図示した。AWI, VWI はクォーク質量の定義の違いで、両者は連続極限で一致すべきものである。 $N_f = 2 + 1$  では AWI 定義だけを図示している。現段階では連続極限で  $N_f = 2 + 1$  と  $N_f = 2$  の結果は同程度となっている。

また、この方法の現状のまとめを報告した (論文 11)。

(5) Ginsparg-Wilson fermion における Schrödinger functional formalism の定式化の研究

Schrödinger functional は非摂動的に計算可能な繰り込み処方を与える有力な手法である。しかし、この方法をカイラル対称性を持つ Ginsparg-Wilson fermion に適用しようとする、ゼロモードが障害となってしまうことが知られていた。この研究ではゼロモードの問題を回避するために、orbifolding を用いた Schrödinger functional formalism の定式化を提唱し、その有効性を検証した (論文 21)。

(6) ウィルソン型のクォークの  $O(a)$  改良係数、繰り込み係数の摂動計算

青木、藏増は、通常の摂動展開の方法を用いて Wilson 型クォークの  $O(a)$  改良の係数である  $c_{sw}$  をクォーク質量がゼロの場合に決定できることを示した。この方法を重いクォークに対する新しい格子作用に適用し、作用の改良係数 (論文 3) やカレントの改良係数/繰り込み係数 (論文 2) を摂動展開の 1 ループで決定した。

(7) 陽子崩壊

標準理論を超える物理を探索する重要な実験の一つとしてスーパーカミオカンデによる陽子崩壊の実験がある。現在のところ何れの崩壊モードも見つかっていないが、長年にわたる実験によって陽子寿命の下限が押し上げられ、大統一理論或いは超対称大統一理論に対する制限は序々に強まってきている。他方理論的予言には幾つかの大きな不確定要素が存在するが、その一つが陽子崩壊におけるハドロン行列要素の評価である。これまでこの行列要素は様々なモデルを使って行われてきたが、それらは陽子の寿命に対して 100 倍程度の不定性を与えていた。格子 QCD を用いてクエンチ近似でこのハドロン行列要素を計算し、カイラル外挿と連続極限への

外挿を初めて実行した。その結果、不定性を大幅に減少させることに成功した。2体行列要素の係数  $\alpha, \beta$  に関し、これまでの模型による予言の約3倍の値が得られ、統一模型により強い制限が加わることを示した(論文9)。

#### (8) 軽いハドロンの散乱位相

ハドロン間相互作用の理解するうえで、ハドロン散乱長、および散乱位相を、格子上の数値計算により第一原理から定量的に評価し実験値と比較することが非常に重要である。しかし、これまで動的フェルミンの効果を見逃し、連続極限をとっていない計算しか行われておらず、不完全な計算結果しかなかった。この研究では、物理系をアイソスピンが2である2体パイメソン系に限定し、散乱長、および散乱位相を動的フェルミンの効果を取り入れた完全な計算の元で計算し、連続極限をとることにより、実験と比較できる最終結果を得ることを目的とした。我々の計算結果は完全に実験と一致しており、当面の目標は達成された。他方、散乱長と散乱位相では、格子間隔依存性が大きく、連続極限をとる際に大きな誤差が産み出されている。この問題は、ゲージ場、およびクォークに非摂動改良作用を用いることにより完全に解決されると期待される。これは将来の課題となった(論文5)。

### 【2】超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

#### (1) 非臨界弦の理論の非摂動効果

1次元以下の時空で定義された非臨界弦と呼ばれる理論は、通常の弦理論のおもちゃの模型として、長年研究されてきた。特にこの理論を使って一般の弦理論の非摂動効果が通常の点粒子の場合と定性的に異なる形になることがわかってきた。この非摂動効果はD-インスタントンと呼ばれる古典解の寄与と同定されている。ところが、このインスタントンの周りの摂動計算はこれまでなされてこなかった。石橋は花田、川合、松尾(以上京大)、早川、黒木、多田(以上理研)等と0次元の非臨界弦の場合には摂動の次のオーダーが計算できることを示し、D-インスタントンの化学ポテンシャルがユニヴァーサルな値を持っていることを示した(論文23)。

石橋は山口(KEK)とともに0次元の非臨界弦におけるD-インスタントンの化学ポテンシャルの計算に現れる発散の原因を調べ、発散が現れないように計算する方法を与えた。この方法で化学ポテンシャルを計算すると、結果はユニヴァーサルであり、花田等によって得られた値と一致することを示した(論文24)。この方法は他の非臨界弦理論に応用可能である。

#### (2) 弦理論/スピン鎖対応

弦理論における「重力/ゲージ理論双対性」の研究に於いて近年進展しているテーマに、反ドジッター時空中の回転する弦とゲージ理論の異常次元の解析に現れるスピン鎖との対応がある。これは超対称性で量子補正が制御されない状態/演算子の対応であり、「重力/ゲージ理論双対性」の動力学的側面を明らかにするものと期待

されている。従来この研究では弦理論側の解析はほとんど古典的であり、その量子論的な情報が必要とされていた。佐藤は藤 (KEK) と共に、弦の角運動量が大きい場合に量子有効作用を系統的に評価する方法を考案し、具体的にその初項を閉じた表式で求めた (論文 25)。

### (3) 超弦理論と非可換性

弦理論において NS-NS セクターの 2 階反対称テンソル場が期待値を持つと、理論に現れる D-ブレーンの世界体積上の座標が非可換になることが知られている。ボソン弦理論においては、この非可換性は次元の高い D-ブレーンが次元の低い D-ブレーンの配位として表せるという事実から導くことが出来る。雨宮、荒木、片桐は超弦理論の場合に同様の事実を示し、非可換性が現れることを示した (論文 26)。

### (4) membrane と matrix string

1 次元コンパクト化された M 理論を記述している理論として matrix string 理論と呼ばれるものが提唱されている。最近、関野と米谷は、コンパクト化された方向にまきついた membrane の行列正則化を考えると丁度この matrix string 理論が得られることを示した。石橋は早川 (理研) とともに、この関野と米谷の結果を M 理論で通常使われている結果を使って導出できることを示した。この事実を使って、matrix string 理論におけるローレンツ変換の生成子を構築し、時空の次元が 10 次元のときローレンツ代数にアノマリーが出ないことを確かめた (論文 27)。

### (5) 非 BPS 領域における AdS/CFT 対応

AdS/CFT 対応によれば、AdS 空間を運動する弦のエネルギーと、AdS の境界における  $N=4$  SYM の複合演算子のスケール次元に対応があることが知られてる。壽崎は KEK の高山、吉田とともに、非 BPS 領域における AdS/CFT 対応を、D ブレーンが AdS 空間に挿入されている場合について調べた。AdS 側で大きな量子数 (角運動量) をもって回転する半古典的な弦を考えることで、非 BPS 領域においてこの対応を調べることができる。一方、SYM 側でも特定の長い複合演算子の異常次元行列の対角化が、これをスピッチェイン模型という可解性をもった統計系のハミルトニアンとみなすことで可能になった。ところが、スピッチェイン模型のコヒーレント状態でハミルトニアンを評価し連続極限をとると、半古典的な弦について適当な非相対論的極限をとって得られる作用と同じものが得られる。この研究では、この作用レベルで対応をみる手法を、 $SO(6)$  セクターについて、D ブレーンに端点をもつて運動する半古典的開弦と、defect と呼ばれる境界上の場と結合した SYM の長い複合演算子に適用し摂動 1-loop レベルで両者に対応があることを示した (論文 28)。

## 〈論文〉

1. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Heavy quark expansion parameters from lattice NRQCD, Phys. Rev. D 69, No.9 (2004) ref.094512, pp.1-17



2. Sinya Aoki, Yasuhisa Kayaba, Yoshinobu Kuramashi, Perturbative Determination of Mass Dependent  $O(a)$  Improvement Coefficients for the Vector and Axial Vector Currents with a Relativistic Heavy Quark Action, Nucl. Phys. B689, No.1,2 (2004) 127-156
3. Sinya Aoki, Yasuhisa Kayaba, Yoshinobu Kuramashi, A Perturbative Determination of Mass Dependent  $O(a)$  Improvement Coefficients in a Relativistic Heavy Quark Action, Nucl. Phys. B697, No.1,2 (2004) 271-301
4. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, Non-perturbative calculation of  $Z_V$  and  $Z_A$  in domain-wall QCD on a finite box, Phys. Rev. D 70, No.3 (2004) ref.034503, pp.1-17
5. CP-PACS Collaboration: T. Yamazaki, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié,  $I = 2 \pi\pi$  Scattering Phase Shift with two Flavors of  $O(a)$  Improved Dynamical Quarks, Phys. Rev. D 70, No.7 (2004) ref.074513, pp.1-26
6. CP-PACS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, V.I. Lesk, M. Okawa, A. Ukawa, T. Umeda, T. Yoshié, Light hadron spectroscopy in two-flavor QCD with small sea quark masses, Phys. Rev. D 70, No.7 (2004) ref.074503, pp.1-27
7. CP-PACS Collaboration: K. Ide, S. Aoki, R. Burkhalter, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, T. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, V. Lesk, M. Okawa, Y. Taniguchi, T. Umeda, A. Ukawa, T. Yoshié, Non-perturbative renormalization of meson decay constants in quenched QCD for a renormalization group improved gauge action, Phys. Rev. D 70, No.7 (2004) ref.074502, pp.1-11
8. CP-PACS Collaboration: S. Takeda, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, Scaling study of the step scaling function in SU(3) gauge theory with improved gauge actions, Phys. Rev. D 70, No.7 (2004) ref.074510, pp.1-10
9. CP-PACS. JLQCD Collaborations: N. Tsutsui, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, Lattice QCD calculation of the proton decay matrix element in the continuum limit, Phys. Rev. D 70, No.11 (2004) ref.11501(R), pp.1-4
10. Sinya Aoki, Oliver Baer, Twisted-mass QCD,  $O(a)$  improvement and Wilson chiral perturbation theory, Phys. Rev. D 70, No.11 (2004) ref.116011, pp.1-14

11. S. Aoki, Y. Kayaba, Y. Kuramashi, N. Yamada, On-shell improvement of the massive Wilson quark action, Proc. YITP mini-workshop on Lattice Field Theory, Kyoto, May 24-28, 2004 (2005), preprint hep-lat/0409001
12. CP-PACS, JLQCD Collaborations: N. Yamada, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa, T. Yoshié, Non-perturbative  $O(a)$ -improvement of Wilson quark action in three-flavor QCD with plaquette gauge action, Phys. Rev. D 71, No.5 (2005) ref.054505, pp.1-16
13. Norikazu Yamada, Sinya Aoki, Yoshinobu Kuramashi, Perturbative determination of mass dependent renormalization and improvement coefficients for the heavy-light vector and axial-vector currents with relativistic heavy and domain-wall light quarks, Nucl. Phys. B713 (2005) 407-431
14. CP-PACS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, V.I. Lesk, M. Okawa, A. Ukawa, T. Umeda, T. Yoshié, Chiral extrapolations with small sea quark mass data in two-flavor lattice QCD, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 314-316
15. Norikazu Yamada, Sinya Aoki, Yoshinobu Kuramashi, One-loop determination of mass dependent  $O(a)$  improvement coefficients for the heavy-light vector and axial-vector currents with relativistic heavy and domain-wall light quarks, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 719-721
16. CP-PACS Collaboration : S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yamazaki, T. Yoshié,  $I = 2$  Pion Scattering Length from Two-Pion Wave Function, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 305-307
17. CP-PACS Collaboration: Y. Kayaba, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Charmed meson spectra and decay constants with one-loop  $O(a)$  improved relativistic heavy quark action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 479-481
18. CP-PACS Collaboration: S. Takeda, S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, A scaling study of the step scaling function of quenched QCD with improved gauge actions, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 740-742
19. CP-PACS, JLQCD Collaborations: T. Ishikawa, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, N. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa, T. Yoshié, Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD Collaborations, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 140 (2005) 225-227

20. JLQCD collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Bulk first-order phase transition in three-flavor lattice QCD with  $O(a)$ -improved Wilson fermion action at zero temperature, Phys. Rev. D submitted, preprint hep-lat/0409016
21. Yusuke Taniguchi, Schrödinger functional formalism with Ginsparg-Wilson fermion, preprint hep-lat/0412024
22. CP-PACS Collaboration : S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yamazaki, T. Yoshié,  $I = 2$  Pion Scattering Length from Two-Pion Wave Functions, Phys. Rev. D submitted, preprint hep-lat/0503025
23. N. Hanada, M. Hayakawa, N. Ishibashi, H. Kawai, T. Kuroki, Y. Matsuo and T. Tada, Loops versus matrices: the nonperturbative aspects of noncritical string Prog. Theor. Phys. 112 (2004) 131-181
24. N. Ishibashi and A. Yamaguchi, On the chemical potential of D-instantons in  $c = 0$  noncritical string theory, preprint hep-th/0503199
25. H. Fuji and Y. Satoh Quantum fluctuations of rotating strings in  $AdS_5 \times S^5$ , preprint hep-th/0504123
26. Y. Amemiya, K. Araki and S. Katagiri, D3-brane from D-instantons in the hybrid formalism of superstring Prog. Theor. Phys. 112 (2004) 745-752
27. M. Hayakawa and N. Ishibashi, Perturbative dynamics of matrix string for the membrane, JHEP (2004) 0404:047
28. Yoshiaki Susaki, Yastoshi Takayama and Kentaroh Yoshida, Open Semiclassical Strings and Long Defect Operators in AdS/dCFT Correspondence, preprint hep-th/0410139

〈著書・総説等〉

1. 石橋 延幸, 「非臨界弦の非摂動効果」, 素粒子論研究 110 (2004) C79-C84

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 雨宮 嘉照  
「Noncommutativity of fermionic coordinates in superstring theory (超弦理論におけるフェルミオニック座標の非可換性)」

## 2. 茅場 靖剛

「Charmed meson spectra and decay constants with one-loop  $O(a\Lambda_{QCD})$  improved Relativistic Heavy Quark action (1ループで  $O(a\Lambda_{QCD})$  改良された相対論的重いクォーク作用を用いたチャームメソンのスペクトラムと崩壊定数)」

### [修士論文]

#### 1. 波田野 直道

「AdS/CFT 対応と古典/量子可積分系」

#### 2. 馬場 裕

「twistor 空間上の弦理論とゲージ理論における振幅」

### <集中講義>

1. 青木 慎也 「数理解物理学 I」 中央大学理学部、2004年12月20日～21日、2005年1月12日

### <その他特記事項>

#### 1. 第1回日本学術振興会賞受賞

青木慎也教授が、「格子ゲージ理論の手法による素粒子物理学の研究 (Research on Particle Physics through Method of Lattice-gauge Theory)」により、第1回日本学術振興会賞を受賞した。授賞式は2005年3月22日(火)に日本学士院で行われた。

この賞は、学術の全分野を対象として、45歳以下の若手研究者を奨励することを目的に、日本学術振興会により昨年創設されたもので、第一回の授賞25件のひとつとして、青木教授が受賞した。受賞理由は以下のとおり：

『素粒子の強い相互作用は2004年のノーベル物理学賞の対象となった量子色力学(QCD)によって定式化されている。受賞者は、連続時空を離散化した時空格子に置き換える格子ゲージ理論の手法を使って、QCDにおける格子フェルミオン作用の相構造を解明し、パリティが自発的に破れた「青木相」を発見した。さらに、格子QCDの大規模数値シミュレーションによって、強い相互作用をする素粒子の性質について多くの優れた成果を挙げている。』

#### 2. 国際会議・国際研究集会の主催・共催

日本学術振興会 先端研究拠点事業「計算素粒子物理学の国際研究ネットワークの形成」(代表：宇川彰)に基づき、格子場の理論国際研究協力ネットワークの形成と、国際格子データグリッド(ILDG)の構築に関連した、一連の国際会議を主催・共催した。

また、金谷らが申請した日本学術振興会 二国間交流事業も採択され、ベルリン郊外のZeuthenで、格子場の理論に関する日独セミナーを開催した。

- (a) 格子場の理論国際研究協力ネットワーク第1回シンポジウム “Lattice QCD simulations via International Research Network”  
2004年9月21-24日, 伊豆 修善寺  
主催: 筑波大学計算科学研究センター、素粒子論研究室  
参加者数: 52 (内、外国人22)、参加国数: 6
- (b) 日本学術振興会 二国間交流事業 日独セミナー “Towards Precision Physics from Lattice QCD Simulated on Tera-Flops Computers (テラフロップススーパーコンピュータが切り開く QCD 高精度シミュレーション)”  
2004年11月25-29日, ドイツ DESY/Zeuthen フォンノイマン計算科学研究所  
オルガナイザー: 金谷和至、中村純 (広島大学教授)、Michael Müller-Preussker (Humboldt 大学教授)、Karl Jansen (DESY/Zeuthen フォンノイマン計算科学研究所長)  
参加者数: 38 (26)、参加国数: 7
- (c) 格子場の理論国際研究協力ネットワーク第1回筑波ワークショップ “Lattice QCD and Particle Phenomenology”  
2004年12月6-17日, 筑波大学 計算科学研究センター  
主催: 筑波大学計算科学研究センター、素粒子論研究室  
参加者数: 42 (11)、参加国数: 4
- (d) 格子場の理論国際研究協力ネットワーク第2回シンポジウム “From Actions to Experiment”  
2005年3月7-10日, 英国エジンバラ大学国立 e-サイエンスセンター  
主催: エジンバラ大学国立 e-サイエンスセンター、筑波大学計算科学研究センター  
参加者数: 30 (23)、参加国数: 5

この他に、第5回国際格子データグリッドワークショップ “5th International Lattice Data Grid Workshop” を、計算科学研究センターと海外の11サイト (Edinburgh, Liverpool, Zeuthen, Marseille, Orsay, Boston, JLAB, FNAL, Utah, Adellaide) をインターネットで結合して開催した。計算科学研究センターが全体のとりまとめを行った。5カ国から30人 (内、外国人23) が参加し、国際格子データグリッドの構築に向けての検討状況報告と討論を行った。

## 〈研究成果発表 (講演)〉

### [国際会議]

1. 武田 真滋 「Scaling study of step scaling function with improved gauge actions in SU(3) gauge theory」,  
Lattice theory mini workshop (YITP, Kyoto, Japan, May 24-28, 2004)

2. 武田 真滋 「Scaling study of step scaling function with improved gauge actions in SU(3) gauge theory」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
3. 茅場 靖剛 「Charmed meson spectra and decay constants with one-loop  $O(a)$  improved relativistic heavy quark action」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
4. 宇川 彰 「Status of International Lattice Data Grid (ILDG)」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
5. 谷口 裕介 「Schroedinger functional formalism with overlap Dirac operator」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
6. 石塚 成人 「 $I = 2$  Pion Scattering Length from Two-Pion Wave Function」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
7. 石川 智己 「Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD collaboration」 ,  
The XXII International Symposium on Lattice Field Theory (Fermilab, Illinois, USA, June 21-26, 2004)
8. 石川 智己 「Light hadron spectrum in  $N_f = 2 + 1$  QCD」 ,  
The 1st International Lattice Field Theory Network Workshop "Lattice QCD simulations via International Research Network" (Shuzenji, Izu, Japan, Sept. 21-24, 2004)
9. 谷口 裕介 「Schrödinger functional formalism with GW fermion」 ,  
The 1st International Lattice Field Theory Network Workshop "Lattice QCD simulations via International Research Network" (Shuzenji, Izu, Japan, Sept. 21-24, 2004)
10. 石塚 成人 「 $I = 2$  Pion Scattering Length from Two-Pion Wave Function」 ,  
The 1st International Lattice Field Theory Network Workshop "Lattice QCD simulations via International Research Network" (Shuzenji, Izu, Japan, Sept. 21-24, 2004)
11. 藏増 嘉伸 「On-shell improvement of the massive Wilson quarks」 ,  
The 1st International Lattice Field Theory Network Workshop "Lattice QCD simulations via International Research Network" (Shuzenji, Izu, Japan, Sept. 21-24, 2004)

12. 青木 慎也 「Twisted mass QCD,  $O(a)$  improvement and WCPT」 ,  
International Workshop "Quantum Fields in the Era of Teraflop-Computing" (ZiF,  
Univ. Bielefeld, Bielefeld, Germany, Nov. 22-25, 2004)
13. 藏増 嘉伸 「Proton decay matrix elements」 ,  
International Workshop "Quantum Fields in the Era of Teraflop-Computing" (ZiF,  
Univ. Bielefeld, Bielefeld, Germany, Nov. 22-25, 2004)
14. 金谷 和至 「QCD on the Earth Simulator」 ,  
International Workshop "Quantum Fields in the Era of Teraflop-Computing" (ZiF,  
Univ. Bielefeld, Bielefeld, Germany, Nov. 22-25, 2004)
15. 宇川 彰 「The future Japanese physics program on Teraflops computer」 ,  
International Workshop "Quantum Fields in the Era of Teraflop-Computing" (ZiF,  
Univ. Bielefeld, Bielefeld, Germany, Nov. 22-25, 2004)
16. 青木 慎也 「Chiral perturbation theory for Wilson-type fermions」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)
17. 武田 真滋 「Scaling behavior of gauge actions」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)
18. 石川 智己 「Status of light hadron mass spectrum in unquenched 2+1 flavor QCD」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)
19. 宇川 彰 「CP-PACS machine plan for 2005-2007」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)
20. 金谷 和至 「Simulation of 2+1 flavor QCD with improved Wilson-type quarks」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)
21. 藏増 嘉伸 「Charmed hadron spectrum with two flavors of dynamical quarks」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Sim-  
ulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29,  
2004)

22. 吉江 友照 「ILDG: Status Report from Japan」 ,  
German-Japanese Symposium "Towards Precision Physics from Lattice QCD Simulated on Tera-Flops Computers" (DESY/Zeuthen, Berlin, Germany, Nov. 25-29, 2004)
23. 武田 真滋 「Wilson chiral perturbation theory for  $N_f = 2 + 1$ 」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
24. 谷口 裕介 「Schrödinger functional formalism with domain-wall fermion」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
25. 青木 慎也 「Neutron electric dipole moment with domain-wall QCD」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
26. 吉江 友照 「Overview of lattice QCD data sharing」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
27. 石川 智己 「Update on the joint CP-PACS-JLQCD  $N_f = 2 + 1$  program」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
28. 藏増 嘉伸 「Scaling study of relativistic heavy quark action applied to b quark in quenched QCD」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
29. 宇川 彰 「The PACS-CS Project and the improved Wilson quark physics program」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
30. Bär, Oliver 「Ginsparg-Wilson quarks on a staggered sea」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
31. 茅場 靖剛 「Charmed mesons with relativistic heavy quark action in two-flavor full QCD」 ,  
The 2nd International Lattice Field Theory Network Workshop "From Actions to Experiment" (NeSC, Edinburgh Univ., Edinburgh, UK, Mar. 7-10, 2005)
32. 青木 慎也 「Chiral Perturbation theory and tmQCD」 ,  
Workshop on "Twisted mass QCD" (Villa Mondragone, Roma, Italy, Mar. 14-15, 2005)



[国内学会、研究会]

1. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment with domain-wall fermion in quenched lattice QCD」 ,  
基研研究会「素粒子物理学の進展」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, June 29-July 2, 2004)
2. 武田 真滋 「Scaling study of step scaling function with improved gauge actions in SU(3) gauge theory」 ,  
基研研究会「素粒子物理学の進展」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, June 29-July 2, 2004)
3. 茅場 靖剛 「Charmed meson spectrum and decay constants with the one-loop  $O(a)$  improved relativistic heavy quark action」 ,  
基研研究会「素粒子物理学の進展」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, June 29-July 2, 2004)
4. 石川 智己 「Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD collaboration」 ,  
基研研究会「素粒子物理学の進展」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, June 29-July 2, 2004)
5. 石橋 延幸 「非臨界弦の非摂動効果」 ,  
基研研究会「場の量子論 2004」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, July 13-16, 2004)
6. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment on quenched lattice QCD」 ,  
日本物理学会秋季大会 (高知大学, 高知, Sept. 27-30, 2004)
7. 壽崎 義明 「4次元非可換空間におけるゲージ理論の非摂動的ダイナミクス」 ,  
日本物理学会秋季大会 (高知大学, 高知, Sept. 27-30, 2004)
8. 茅場 靖剛 「Charmed meson spectrum and decay constants from two-flavor lattice QCD with the one-loop  $O(a)$  improved relativistic heavy quark action」 ,  
日本物理学会秋季大会 (高知大学, 高知, Sept. 27-30, 2004)
9. 片桐 奏羽 「D-Brane in Constant Background」 ,  
日本物理学会秋季大会 (高知大学, 高知, Sept. 27-30, 2004)
10. 石川 智己 「Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD collaboration」 ,  
日本物理学会秋季大会 (高知大学, 高知, Sept. 27-30, 2004)
11. 壽崎 義明 「4次元非可換空間におけるゲージ理論の非摂動的ダイナミクス」 ,  
基研研究会「格子ゲージ理論の新しい芽と発展」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, Dec. 8-10, 2004)

12. 壽崎 義明 「4次元非可換空間におけるゲージ理論の非摂動的ダイナミクス」,  
基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」(京都大学基礎物理学研究所, 京都,  
Dec. 16-18, 2004)
13. 茅場 靖剛 「Charmed meson spectrum and decay constants with relativistic heavy  
quark action」,  
計算科学研究センター研究会「CP-PACSによる計算物理学2004」(筑波大学, つく  
ば, Feb. 10, 2005)
14. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment on quenched lattice QCD」,  
日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学, 野田, 千葉, Mar. 24-27, 2005)
15. 壽崎 義明 「Open semi-classical strings and long defect operators in AdS/dCFT  
correspondence」,  
日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学, 野田, 千葉, Mar. 24-27, 2005)
16. 茅場 靖剛 「Charmed meson spectra and decay constants with one-loop  $O(a\Lambda_{QCD})$   
improved relativistic heavy quark action」,  
日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学, 野田, 千葉, Mar. 24-27, 2005)
17. 片桐 奏羽 「ピュアスピノールと弦理論」,  
日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学, 野田, 千葉, Mar. 24-27, 2005)
18. 中村 庸介 「超対称性模型における  $K^0$ - $\bar{K}^0$  混合の格子ドメインウォール QCD を用  
いた解析」,  
日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学, 野田, 千葉, Mar. 24-27, 2005)