「格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用」研究成果報告書

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所　橋本省二

scqcd グループ

平成 18 年 2 月 1 日

1　研究組織

scqcd グループは KEK、筑波大、京大基研、広島大を主体とするグループで、「大型シミュレーション研究」の開始当初から、格子 QCD の大規模シミュレーションを通じて、素粒子物理学の非摂動的研究を行ってきた。対外的には JLQCD collaboration の名前で研究発表を行っている。

- 研究責任者
  - 橋本 省二 (はしもと しょうじ)
    高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助教授
- 研究従事者
  - 金児 隆志 (かねこ たかし)
    高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助手
  - 山田 憲和 (やまだ のりかず)
    高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助手
  - 筒井 直人 (つつい なおと)
    日本学術振興会 特別研究員 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 所属)
  - 青木 慎也 (あおき しんや)
    筑波大学 物理学系 教授
  - 宇川 彰 (うかわ あきら)
    筑波大学 計算科学研究センター長、教授
  - 金谷 和至 (かなや かずゆき)
    筑波大学 物理学系 教授

– 石塚 成人 (いしづか なるひと)
筑波大学 計算科学研究センター 助教授
– 吉江 友照 (よしえ ともてる)
筑波大学 計算科学研究センター 助教授
– 蔵増 嘉伸 (くらまし よしのぶ)
筑波大学 計算科学研究センター 講師
– 福来 正孝 (ふくぎた まさたか)
東京大学 宇宙線研究所 教授
– 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)
京都大学 基礎物理学研究所 助教授
– 大川 正典 (おおかわ まさのり)
広島大学大学院 理学研究科 教授
– 石川 健一 (いしかわ けんいち)
広島大学大学院 理学研究科 助教授

2 研究動機

自然界の強い相互作用は量子色力学 (QCD) で記述されるが、低エネルギーでの QCD はその非摂動的な性質のために、解析的な手法では定量的な予言を与えるのが多くの場合に非常に困難である。格子上に定義された QCD(以下では格子 QCD) は、QCD の非摂動的性質を数値シミュレーションを使って定量的に計算する手法を与えており、計算機の急速な進歩にともなって物理量の現実的な計算が可能になりつつある。ここで問題になるのは、種々の要因から来る計算精度である。素粒子物理の実験や現象論と組み合わせて意味のある予言を与えるには、モンテカルロ法による統計誤差はもちろん、有限格子間隔による誤差、有限格子体積による誤差、有限のクォーク質量からの外挿による誤差などを小さく抑え、かつそれらの信頼できる評価が必要になる。したがって格子 QCD 計算においては、これらの特に系統誤差を抑制することが主要な研究課題になっている。

動的クォークの効果を無視したクエンチ近似の範囲内では、すでに大規模な数値計算が行われ、種々のハドロンの質量や行列要素の値が高い精度で求められている。1995 年から 99 年にかけて行ったいわゆる第一期の JLQCD collaboration の研究は、主として有限格子間隔による誤差を抑制するために格子化の精度を上げたり ($O(a)$-improvement)、格子間隔がゼロの極限への外挿を試みるものであった。それらは、K 中間子のバッグパラメタ B_K の計算 [1, 2, 3]、B 中間子の崩壊定数とバッグパラメタの計算 [4, 5, 6]、ストレンジクォーク質量とパイ中間子崩壊定数の計算 [7, 8] である。それら以外にも、カイラル相転移のスケーリングの研究 [9]、$K \to \pi\pi$ 崩壊振幅の計算 [10]、陽子崩壊行列要素の計算 [11]、B 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の計算 [12]、$\pi\pi$ 散乱の散乱長の計算 [13] など、多岐にわたる研究をすすめてきた。

これらの研究によって、系統誤差の評価は格段に進歩したものの、クェンチ近似による誤差は積み残された課題であった。クェンチ近似の効果を定量的に評価するには、多くの場合、実際にクェンチによらないシミュレーションを実行してみるしかなく、そのためには膨大な計算量を必要とする。2000 年 3 月に日立 SR8000 が導入されて 1.2 TFlops という、当時としてはこの分野で最速の計算機を用いて行う研究課題は、当然この積み残されたクェンチ近似を取り除くための大規模シミュレーションの実行であった。これにより、真の意味での第一原理計算による予言に格段に近づくことができる。

特に素粒子物理学の現象論との関係で重要なのは、B 中間子と K 中間子の崩壊におけるハドロンの行列要素の計算である。KEK は B ファクトリー実験によって B の物理における世界の中心の一つになっているが、B の物理において CP の破れの測定と同様に重要なことは、小林益川行列要素を精密に決定して標準理論の検証を行うことである。現在のところ、いくつかの小林益川行列要素の決定精度はハドロン行列要素の不定性で制限されており、この点で格子 QCD シミュレーションの役割は本質的である。同様に、K 中間子崩壊の研究や陽子崩壊を通じた大統一模型の研究においてもハドロンの不定性が理論の予言可能性を制限しており、格子 QCD の進歩が素粒子物理学全体の中でも重要な課題になっている。

本研究課題の目的は、これらの重要なハドロン行列要素をクェンチ近似によらない格子 QCD のシミュレーションで計算すること、またそのための基本的な手法を開発することである。

3　研究経過および成果

3.1　$N_f = 2$ シミュレーション

2000 年 3 月に、日立 SR8000 が導入された当初から、フレーバー数 $N_f = 2$ の場合の QCD の大規模シミュレーションを行ってきた。それまでのクェンチ近似による物理量の計算の多くを動的クォークの効果を含めて実行することを目的とするものである。

このシミュレーションでは、格子化による誤差を最小限にするために非摂動的に改良したウィルソンフェルミオンを採用した。この定式化はクェンチ近似の範囲内ではその効果が非常によく確認されているもので、数値的な連続極限を取ることなく $O(a\Lambda_{QCD})$ の誤差を取り除くことができる点で有利である。また、有限体積効果の見積もりのために $12^3 \times 48$, $16^3 \times 48$, $20^3 \times 48$ の 3 つの体積でシミュレーションを実行し、最も大きな格子 $(20^3 \times 48)$ では中間子の質量における有限体積効果は充分に小さいことを確認している。

動的クォークの効果を有意に判別するには、充分な統計量を集めて精度のよい計算をする必要がある。このシミュレーションでは、一つのパラメタについて 12,000 HMC トラジェクトリ (分子動力学法における時間の長さ) というそれまでにない高統計に計算を行い、かつ 5 つのクォーク質量についてそれぞれシミュレーションを実行することで実質的な統計量を増やしている。これにより、クォーク質量依存性について統計的に意味のある結論を出せる初めてのシミュレーションとなった。

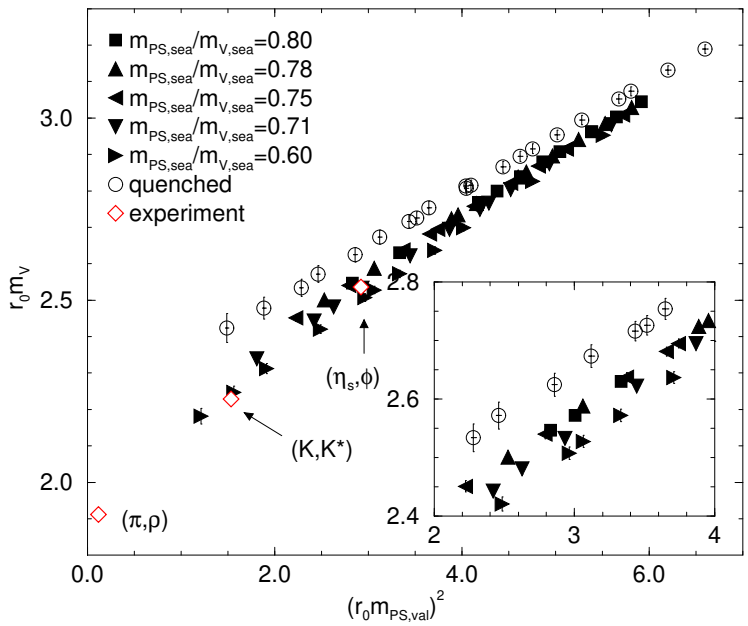

図 1: ベクトル中間子質量のクェンチ近似との比較。

このシミュレーションの最初の結果として、軽いハドロンのスペクトルの解析を行った [14, 15, 16, 17]。図 1 に、ベクトル中間子の質量をパイ中間子質量の 2 乗の関数としてプロットしたものを示す。白丸はクェンチ近似における結果、黒塗りの点は動的クォーク効果を含むシミュレーションの結果である。図から明らかなように、中間子の質量は動的クォークの効果で有意にずれ、かつ実験で知られている中間子の質量に近づくことがわかる。この様子は、ダイナミカルクォークの質量を小さくしていくとより顕著になる。また、同時にストレンジクォークの質量や擬スカラー中間子の崩壊定数についても、$N_f = 2$ での結果が得られた

一方、ダイナミカルフェルミオンのシミュレーション全体における問題点も明らかになってきた。低エネルギー領域での QCD はカイラル有効理論で記述され、パイ中間子の質量と運動量に関する展開として系統的に取り扱うことができる。したがって、格子 QCD のシミュレーションも、充分にクォーク質量の小さい領域ではカイラル有効理論で記述できるはずで、特にその予言するカイラルログと呼ばれる質量依存性が観測できるはずである。しかしながら、われわれのシミュレーションの結果はこのカイラルログの存在と矛盾しており、むしろ単なるバレンスクォークモデルに特徴的な線形の質量依存性を示している (図 2)。このことは、シミュレーションで扱っているクォークの質量が充分に小さくないことを示しており、図に示すように、カイラル極限への外挿の際に大きな不定性を生む可能性がある [18]。

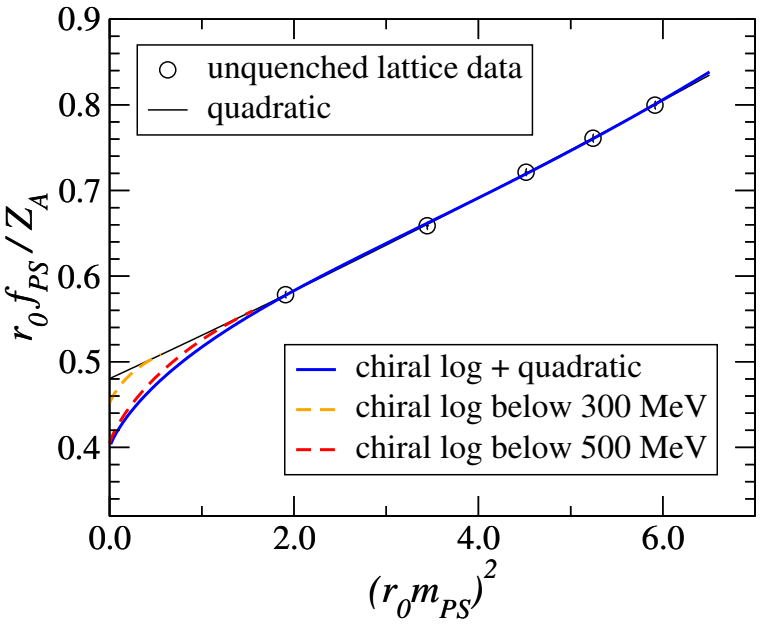

図 2: 擬スカラー中間子の崩壊定数のカイラル極限。

3.2 B 中間子の崩壊定数とバッグパラメタ

上記の大規模シミュレーションで得られたゲージ配位のデータを基に、B 中間子の崩壊定数 f_B とバッグパラメタ B_B の計算を行った [19, 20, 21, 22, 23, 24]。重い b クォークの作用としては、非相対論的有効理論を用い、$1/m_b$ 補正も取り入れている。計算手法としては、以前にクェンチ近似の範囲内で行ったもの [5, 6] と同様であり、我々以前にも動的クォークの効果を取り入れた計算はあったが、動的クォークについてカイラル極限をとり、そのパイ中間子ループ補正まで考慮して解析を行ったのはこれが初めてであった。

結果としては、図 3 に示す通り、r_0 をスケールとしてとる限りクェンチ近似との違いは顕著ではない。ただし、カイラル極限ではパイ中間子ループの効果を考慮する必要があり、それまでに考えられていたよりも f_B の値は小さくなり得ることがわかった。この結果は Particle Data Group の $|V_{td}|$ の世界平均を始め、多く用いられている。

また、崩壊定数の計算としては、さらに精度のよい計算のために Grinstein 比と呼ばれる二重比 $(f_{B_s}/f_B)/(f_{D_s}/f_D)$ の計算を実施した [25, 26]。比を取る前の崩壊定数は、統計誤差やカイラル外挿による誤差、さらには連続理論へのマッチングのための有限くりこみによる誤差のために 15% 程度の誤差が残っているが、二重比では安全に見積もっても誤差は 1% 以下にできることがわかった。

3.3 K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子

小林益川行列要素 $|V_{us}|$ は、K 中間子のセミレプトニック崩壊 $K \to \pi l \nu$ (K_{l3} 崩壊と呼ばれる) を通じて決定することができ、SU(3) カイラル対称性のおかげで理論的な不定性も 1%程度まで抑えられると考えられている。しかしながら、より注意深く見ると、SU(3)

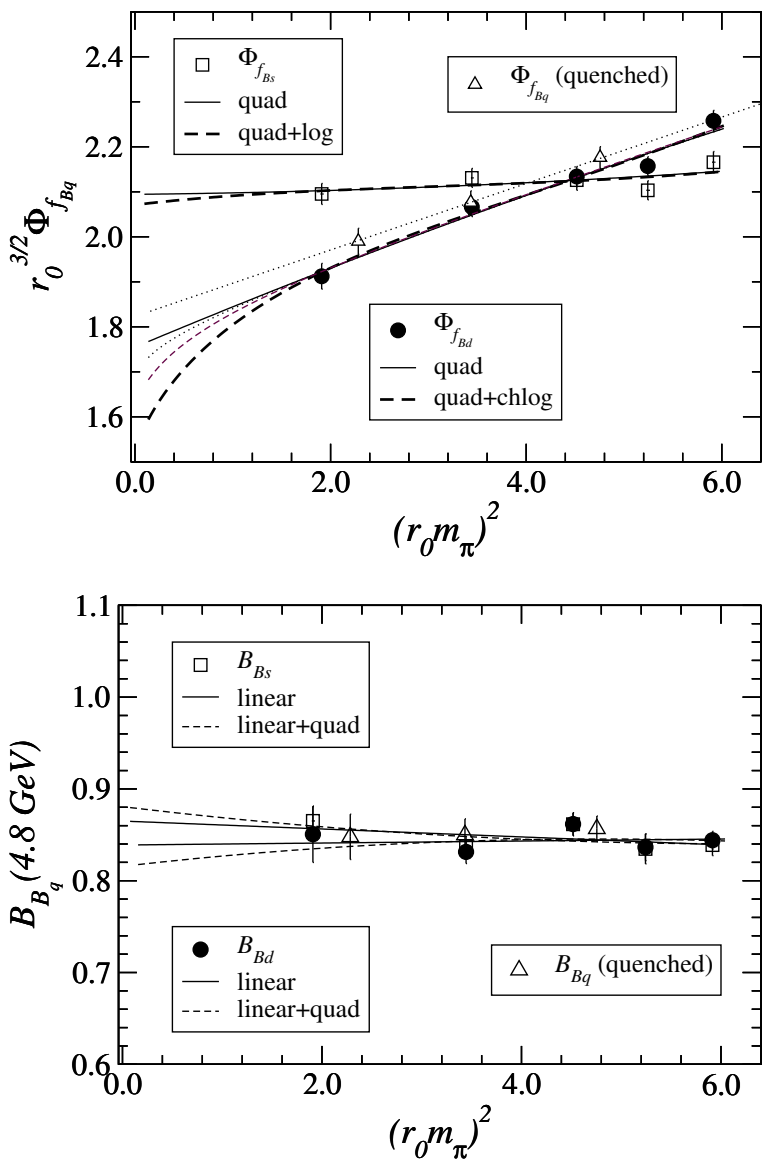

図 3: B 中間子の崩壊定数 (上) とバッグパラメタ (下) のカイラル極限。マルは B_d 中間子、四角は B_s 中間子をしめす。三角はクェンチ近似における B_d 中間子に対する結果。

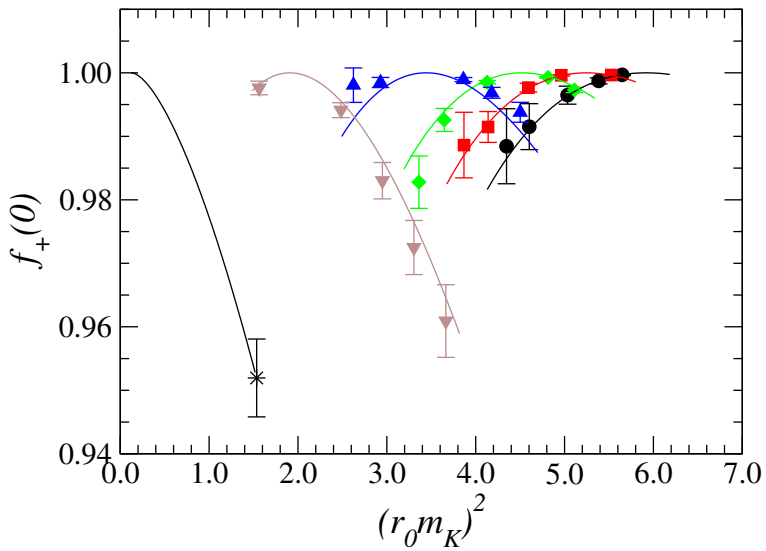

図 4: K 中間子のセミレプトニック崩壊形状因子 $f^+(0)$。SU(3) 対称性のある極限では厳密に 1 になるが、図はそこからのずれを示している。

の破れを評価する理論計算はモデルに頼っており、不定性の大きさは過小評価されている可能性がある。この形状因子の精密計算を進めて、クェンチ近似によらない計算としては初めてとなる結果を発表した [27]。ここでは、軽いハドロンの SU(3) 対称性を最大限に使う二重比によって格子計算の誤差を削減し、意味のある 1% 程度の精度の計算ができるようになった。

図 4 は、5 つの動的クォークの質量に対してストレンジクォークの質量を動かしながら SU(3) 対称性の破れを見たものである。

この計算と同時にパイ中間子の形状因子についても結果が得られた。これはカイラル極限で強いログ依存性を示すことが知られており、格子計算の結果との比較に興味があるが、図 5 に示すように、パイ中間子崩壊定数などと同じく格子計算からはログ的な振る舞いは見られなかった [28]。しかしながら、カイラルログを仮定すれば現象論的結果と一致する結果が得られる。

3.4 動的クォークのためのアルゴリズム

動的クォークのシミュレーションは、非常に計算コストのかかる問題である。計算機の性能向上はもちろんだが、それと同時にアルゴリズムの改善も欠かせない。

JLQCD collaboration では、$N_f = 2$ のシミュレーションに続いて、より現実に近い $N_f = 2+1$、つまりストレンジクォークの効果も含むシミュレーションに進んだ。このためには、奇数フレーバーのためのシミュレーションアルゴリズムが必要になるが、通常の Hybrid Monte Carlo 法では扱うことができない。われわれは、行列の逆数の平方根を多項式で近似する方法を用いればこの問題は解消できることを示した [29, 30]。また同時に、$O(a)$ 改良されたウィルソンフェルミオンのシミュレーションを高速化する前処理の手法

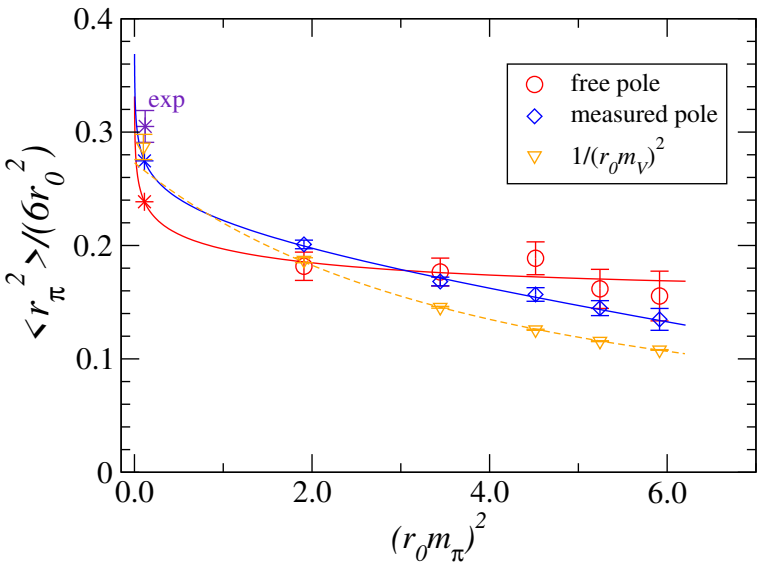

図 5:

も提案している。

これと同様の多項式展開の手法を用いれば、Kogut-Susskind 型のフェルミオンのシミュレーションでも厳密なアルゴリズムを構築することができる。このことを初めてしめした [31, 32]。

3.5 $N_f = 3$ QCD の相図

$N_f = 2 + 1$ でのシミュレーションを進めていくうちに、動的なウィルソンフェルミオンには、予期していなかった相転移があることが次第に明らかになってきた。$N_f = 2$ でもパラメタによっては起こることだが、$N_f = 3$ では非常に顕著になることを明らかにした [33, 34]。

図 6 が示すように、$N_f = 3$ のウィルソンフェルミオンには、(β, κ) 平面に明らかな一次相転移が存在する。このことは、ある格子間隔よりも粗い格子からは連続極限に近づけないことを示しており、現実のシミュレーションを行う際に問題になる。この問題は岩崎型作用など、ゲージ作用を改善することで避けられることも示した。

現在ではこの相転移はより広範に知られており、動的ウィルソンフェルミオンに共通なものと理解されている。ただし、どれだけクォーク質量を軽くすると出てくるかはゲージ作用にもよっており、どこまで近づくと危険かも完全にはわかっていない。

3.6 $N_f = 2 + 1$ シミュレーション

本格的な $N_f = 2 + 1$ シミュレーションを始めるにあたって、KEK の SR8000 だけでは計算能力が不足することがあり、筑波大学計算物理学研究センター (現、計算科学研究セ

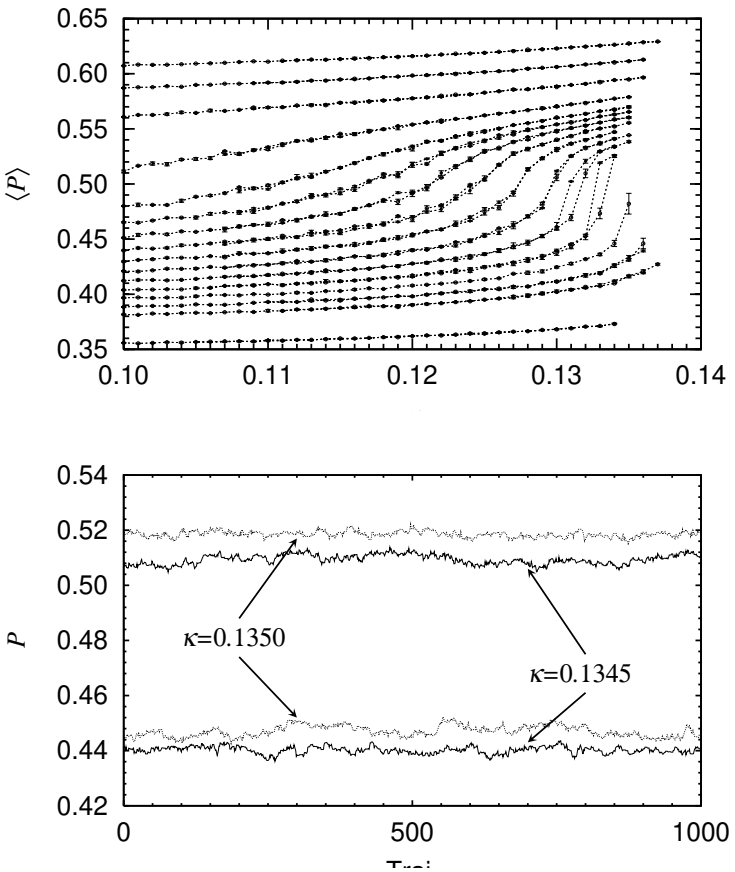

図 6: $8^3 \times 16$ 格子での熱サイクル (上) と、$12^3 \times 24$ 格子での 2 状態共存 (下)。

ンター) の CP-PACS や地球シミュレータも動員して最大規模のシミュレーションを実行することにした。

$N_f = 3$ では、ウィルソンフェルミオンの非摂動的な $O(a)$ 改良の係数 c_{SW} が知られていなかったため、まずこの計算を行った [35, 36, 37, 38]。シュレーディンガー汎関数法を用いるが、動的クォークを取り入れたシミュレーションが必要なので、これだけでも大きな計算能力を必要とするが、この結果、大規模シミュレーションに必要なパラメタ領域での係数を決定することができた。結果を図 7 に示す。

$N_f = 2 + 1$ での大規模シミュレーションは、格子の大きさが約 2 fm、格子間隔 3 点で連続極限での結果を得ることを目標として行った。まず最初に軽いハドロンの質量、続いて種々の行列要素の計算を進める予定である。軽いハドロンの質量の解析は最終結果には至っていないが、予備的な結果では、$N_f = 2$ のときよりもさらに実験値に近づく傾向が得られている [39, 40, 41, 42]。結果を図 8 に示す。

3.7 ハドロン行列要素

動的クォーク効果を調べる研究以外にも、ハドロン行列要素の研究を行った。

重いクォーク展開のパラメタの計算 [43, 44] では、重いクォークの有効理論で現れる行列要素 μ_π^2 の計算を行った。これらは重いハドロン間の質量差の評価に使うことができる。

また、陽子崩壊の行列要素の計算では、以前の結果 [11] をさらに精密にするために、クェンチ近似の範囲内で連続極限での値を求めた [45, 46]。図 9 に、精密化した行列要素で大統一模型に対する制限がどれだけ厳しくなったかを示した。

4 平成 17 年度の報告

平成 17 年度は、上記のうち特に 3.3 章の K 中間子崩壊形状因子の計算および 3.6 章の $N_f = 2 + 1$ シミュレーションを重点的に実施した。

K 中間子崩壊形状因子については、32 ノードパーティションを使った本格的な計算は平成 16 年度後半からはじめ、平成 17 年度の前半まで行った。3.3 章で説明した方針にしたがって解析を行い、国際会議で予備的な結果の発表を行った??。さらに、同様の手法を用いた重いクォークのセミレプトニック崩壊形状因子に関してもテスト的なシミュレーションを実施した。

$N_f = 2 + 1$ シミュレーションについては、最も細かい $28^3 \times 56$ 格子でのシミュレーションを引き続き行った。最も重いパラメタについては KEK の SR8000 で、その他のパラメタは地球シミュレータを用いて実行した。当初予定していた統計量に達し、プロジェクト全体のデータ取得は完了した。予備的な結果を Lattice 2005 で発表している [42]。

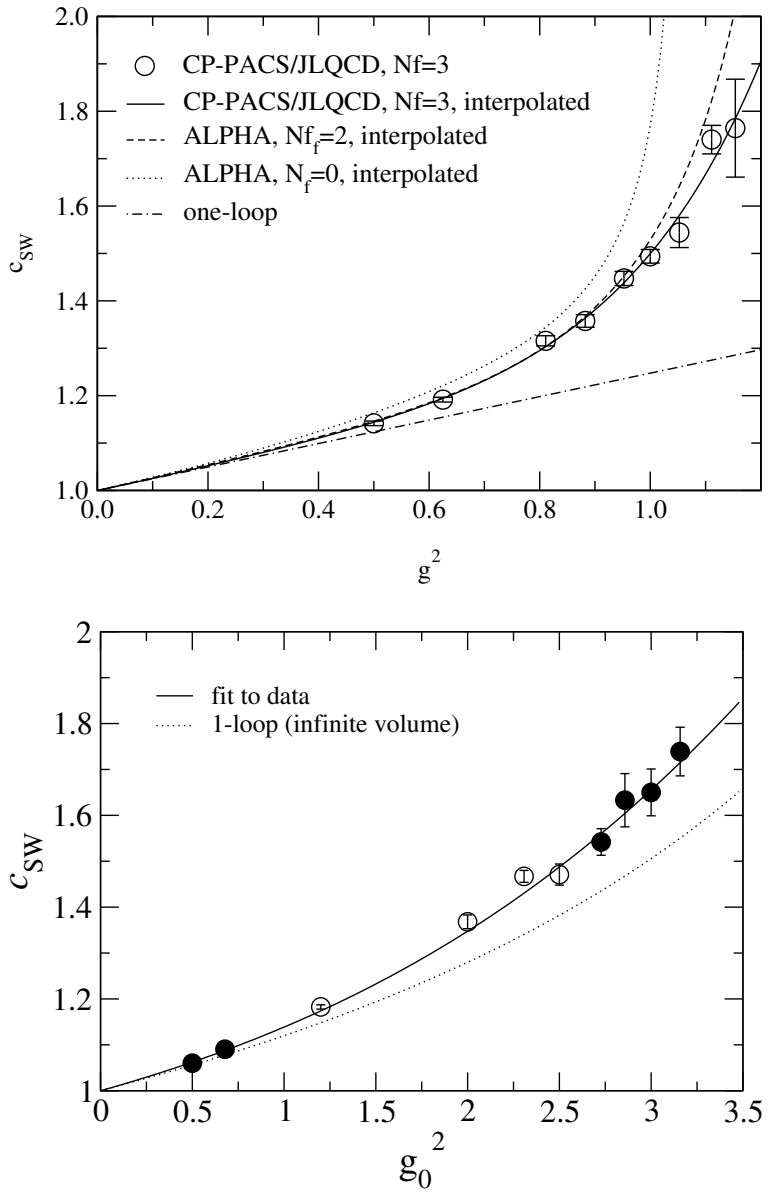

図 7: $N_f = 3$ での $O(a)$ 改良の係数 c_{SW} の非摂動的決定。上はウィルソン型ゲージ作用、下は岩崎型。

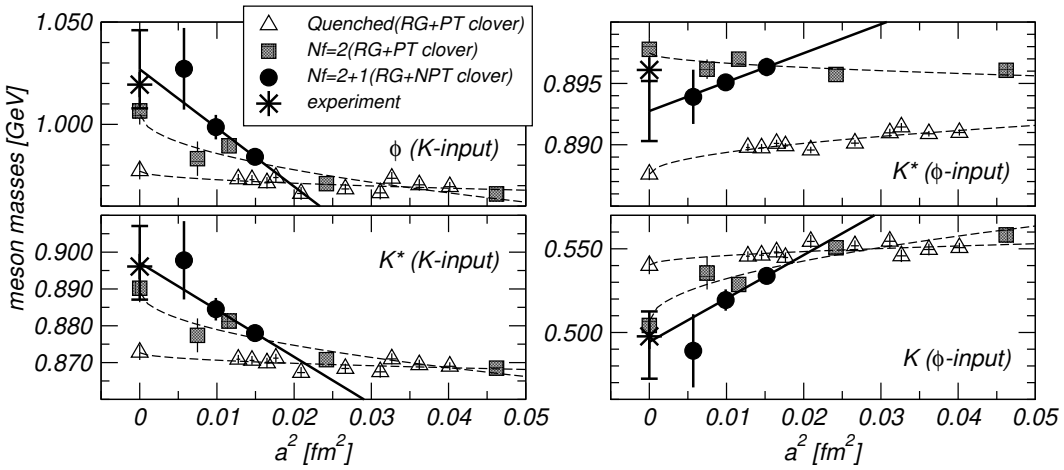

図 8: $N_f = 2 + 1$ シミュレーションで得られたベクトル中間子の質量。格子間隔 a の 2 乗の関数としてプロットしてある。

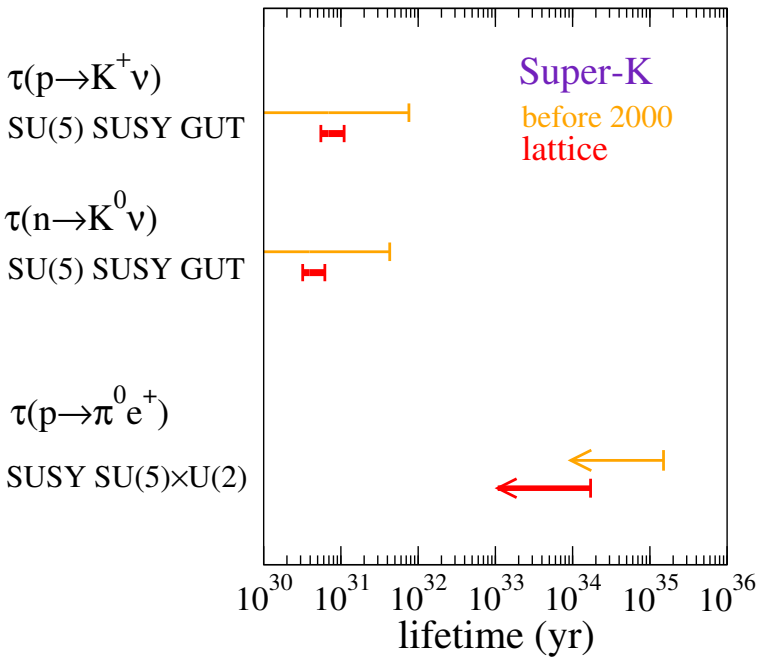

図 9: 大統一模型があたえる陽子の寿命に対する予言と、スーパーカミオカンデによる観測。

5 成果発表 (2000–2005 年度)

- **査読付き論文**: [17, 24, 30, 31, 34, 37, 38, 44, 46]
  これらの内訳は以下の通り。
  - Physical Review Letters: 1
  - Physical Review D: 7
  - Computational Physics Communication: 1
- **国際会議のプロシーディング論文** [14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 45]
  これらの内訳は以下の通り。
  - Lattice 2000 (Bangalore): 1
  - Lattice 2001 (Berlin): 4
  - Lattice 2002 (Boston): 5
  - Lattice 2003 (Tsukuba): 4
  - Lattice 2004 (Fermilab): 1
  - Lattice 2005 (Dublin): 3
  - others: 5
- **メンバーによる招待レビュー講演など**
  - **青木慎也**: Hadron spectrum at Lattice 2000 [47]
  - **金児隆志**: Hadron spectrum at Lattice 2001 [48]
  - **宇川彰**: panel discussion on simulation costs at Lattice 2001 [49]
  - **山田憲和、橋本省二**: B mixing and semileptonic decays at the CKM workshop [50]
  - **山田憲和**: Heavy quark physics at Lattice 2002 [51]
  - **石塚成人**: $K \to \pi\pi$ decay at Lattice 2002 [52]
  - **橋本省二**: panel discussion on chiral extrapolation at Lattice 2002 [53]
  - **大野木哲也**: B physics at KEK Topical Conference 5 [54]
  - **石川健一**: Hadron spectrum at Lattice 2004 [55]
  - **橋本省二**: Lattice QCD overview at ICHEP2004 [56]

参考文献

[1] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Lattice QCD calculation of the kaon B-parameter with the Wilson quark action," Phys. Rev. Lett. **81**, 1778 (1998) [arXiv:hep-lat/9705035].

[2] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "The kaon B-parameter with the Wilson quark action using chiral Ward identities," Phys. Rev. D **60**, 034511 (1999) [arXiv:hep-lat/9901018].

[3] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Kaon B parameter from quenched lattice QCD," Phys. Rev. Lett. **80**, 5271 (1998) [arXiv:hep-lat/9710073].

[4] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy meson decay constants from quenched lattice QCD," Phys. Rev. Lett. **80**, 5711 (1998).

[5] K. I. Ishikawa *et al.* [JLQCD Collaboration], "B meson leptonic decay constant with quenched lattice NRQCD," Phys. Rev. D **61**, 074501 (2000) [arXiv:hep-lat/9905036].

[6] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing in quenched lattice QCD. ((U)) ((W))," Phys. Rev. D **67**, 014506 (2003) [arXiv:hep-lat/0208038].

[7] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Non-perturbative determination of quark masses in quenched lattice QCD with the Kogut-Susskind fermion action," Phys. Rev. Lett. **82**, 4392 (1999) [arXiv:hep-lat/9901019].

[8] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Pion decay constant for the Kogut-Susskind quark action in quenched lattice QCD," Phys. Rev. D **62**, 094501 (2000) [arXiv:hep-lat/9912007].

[9] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Scaling study of the two-flavor chiral phase transition with the Kogut-Susskind quark action in lattice QCD," Phys. Rev. D **57**, 3910 (1998) [arXiv:hep-lat/9710048].

[10] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$K^+ \to \pi^+\pi^0$ decay amplitude with the Wilson quark action in quenched lattice QCD," Phys. Rev. D **58**, 054503 (1998) [arXiv:hep-lat/9711046].

[11] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Nucleon decay matrix elements from lattice QCD," Phys. Rev. D **62**, 014506 (2000) [arXiv:hep-lat/9911026].

[12] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Differential decay rate of $B \to \pi\ell\nu$ semileptonic decay with lattice NRQCD," Phys. Rev. D **64**, 114505 (2001) [arXiv:hep-lat/0106024].

[13] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$I = 2$ pion scattering length with the Wilson fermion," Phys. Rev. D **66**, 077501 (2002) [arXiv:hep-lat/0206011].

[14] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Light hadron spectroscopy with two flavors of $O(a)$ improved dynamical quarks," presented at 18th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2000), Bangalore, India, 17-22 Aug 2000; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **94**, 233 (2001) [arXiv:hep-lat/0010086].

[15] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Exploration of sea quark effects in two-flavor QCD with the $O(a)$-improved Wilson quark action," presented at 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 224 (2002) [arXiv:hep-lat/0110179].

[16] T. Kaneko *et al.* [JLQCD Collaboration], "Light hadron spectrum with two flavors of $O(a)$ improved dynamical quarks: Final results from JLQCD," presented at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 329 (2003) [arXiv:hep-lat/0209057].

[17] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Light hadron spectroscopy with two flavors of $O(a)$-improved dynamical quarks," Phys. Rev. D **68**, 054502 (2003) [arXiv:hep-lat/0212039].

[18] S. Hashimoto *et al.* [JLQCD Collaboration], "Chiral extrapolation of light-light and heavy-light decay constants in unquenched QCD," presented at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 332 (2003) [arXiv:hep-lat/0209091].

[19] N. Yamada and S. Hashimoto [JLQCD collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing from lattice QCD," proceedings of the 4th International Workshop on B Physics and CP Violation (BCP4), 19-23 Feb. 2001, Ise-Shima, Japan; published in Ise-Shima 2001, B physics and CP violation 307-310, arXiv:hep-ph/0104136.

[20] S. Hashimoto and N. Yamada [JLQCD collaboration], "Width difference of the B_s mesons from lattice QCD," proceedings of the 4th International Workshop on B Physics and CP Violation (BCP4), 19-23 Feb. 2001, Ise-Shima, Japan; published in Ise-Shima 2001, B physics and CP violation 307-310, arXiv:hep-ph/0104080.

[21] N. Yamada [JLQCD Collaboration], "Lattice NRQCD calculation of $B^0 - \bar{B}^0$ mixing," prepared for International Euroconference in Quantum Chromodynamics: 15 Years of the QCD - Montpellier Conference (QCD 00), Montpellier, France, 6-13 Jul 2000; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **96**, 377 (2001).

[22] N. Yamada *et al.* [JLQCD Collaboration], "B meson B-parameters and the decay constant in two-flavor dynamical QCD," prepared for 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 397 (2002) [arXiv:hep-lat/0110087].

[23] N. Yamada [JLQCD Collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing in two-flavor dynamical lattice QCD," prepared for 5th KEK Topical Conference: Frontiers in Flavor Physics (KEKTC5), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 20-22 Nov 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **111**, 279 (2002).

[24] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing in unquenched lattice QCD," Phys. Rev. Lett. **91**, 212001 (2003) [arXiv:hep-ph/0307039].

[25] T. Onogi *et al.* [JLQCD Collaboration], "Precise determination of the Grinstein ratio of heavy-light decay constant in unquenched QCD," prepared for 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 610 (2003).

[26] T. Onogi *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy-light decay constants for B and D mesons in $n_f = 2$ unquenched QCD in Fermilab formalism," prepared for 21st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2003), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 15-19 Jul 2003; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 373 (2004).

[27] N. Tsutsui *et al.* [JLQCD Collaboration], "Kaon semileptonic decay form factors in two-flavor QCD," presented at 23rd International Symposium on Lattice Field Field: Lattice 2005, Trinity College, Dublin, Ireland, 25-30 Jul 2005; PoS **LAT2005**, 357 (2005) [arXiv:hep-lat/0510068].

[28] S. Hashimoto *et al.* [JLQCD Collaboration], "Pion form factors in two-flavor QCD," presented at 23rd International Symposium on Lattice Field Field: Lattice 2005, Trinity College, Dublin, Ireland, 25-30 Jul 2005; PoS **LAT2005**, 336 (2005) [arXiv:hep-lat/0510085].

[29] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "An exact algorithm for three-flavor QCD with $O(a)$-improved Wilson fermions," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 1079 (2002) [arXiv:hep-lat/0110107].

[30] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Polynomial hybrid Monte Carlo algorithm for lattice QCD with odd number of flavors," Phys. Rev. D **65**, 094507 (2002) [arXiv:hep-lat/0112051].

[31] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "An exact algorithm for any-flavor lattice QCD with Kogut-Susskind fermion," Comput. Phys. Commun. **155**, 183 (2003) [arXiv:hep-lat/0208058].

[32] K. I. Ishikawa *et al.* [JLQCD Collaboration], "An exact polynomial hybrid Monte Carlo algorithm for dynamical Kogut-Susskind fermions," presented at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 1000 (2003) [arXiv:hep-lat/0209061].

[33] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Non-trivial phase structure of $N_f = 3$ QCD with $O(a)$-improved Wilson fermion at zero temperature," prepared for 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 263 (2002) [arXiv:hep-lat/0110088].

[34] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Bulk first-order phase transition in three-flavor lattice QCD with $O(a)$-improved Wilson fermion action at zero temperature," Phys. Rev. D **72**, 054510 (2005) [arXiv:hep-lat/0409016].

[35] S. Aoki *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Non-perturbative determination of c_{SW} in three-flavor dynamical QCD," presented at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 433 (2003) [arXiv:hep-lat/0211034].

[36] K. I. Ishikawa *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Study of finite volume effects in the non-perturbative determination of c_{SW} with the SF method in full three-flavor lattice QCD," submitted to 21st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2003), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 15-19 Jul 2003; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 444 (2004) [arXiv:hep-lat/0309141].

[37] N. Yamada *et al.* [JLQCD Collaboration], "Non-perturbative O(a)-improvement of Wilson quark action in three-flavor QCD with plaquette gauge action," Phys. Rev. D **71**, 054505 (2005) [arXiv:hep-lat/0406028].

[38] S. Aoki *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Nonperturbative O(a) improvement of the Wilson quark action with the RG-improved gauge action using the Schroedinger functional method," to appear in Phys. Rev. D; arXiv:hep-lat/0508031.

[39] T. Kaneko *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Light hadron spectrum in three-flavor QCD with $O(a)$-improved Wilson quark action," presented at 21st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2003), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 15-19 Jul 2003; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 188 (2004) [arXiv:hep-lat/0309137].

[40] K. Kanaya [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Three flavor dynamical QCD project by CP-PACS / JLQCD," presented at 2nd Cairns Topical Workshop on Lattice Hadron Physics 2003 (LHP 2003), Cairns, Australia, 22-30 Jul 2003; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **128**, 100 (2004) [arXiv:hep-lat/0310040].

[41] T. Ishikawa *et al.* [CP-PACS Collaboration], "Light hadron spectrum in 2+1 flavor full QCD by CP-PACS and JLQCD collaborations," presented at 22nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2004), Batavia, Illinois, 21-26 Jun 2004; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **140**, 225 (2005) [arXiv:hep-lat/0409124].

[42] T. Ishikawa *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Light hadron spectrum and quark masses in 2+1 flavor QCD," presented at 23rd International Symposium on Lattice Field Field: Lattice 2005, Trinity College, Dublin, Ireland, 25-30 Jul 2005; PoS **LAT2005**, 057 (2005) [arXiv:hep-lat/0509142].

[43] N. Tsutsui *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy quark expansion parameters from lattice NRQCD," prepared for 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 376 (2002) [arXiv:hep-lat/0110178].

[44] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy quark expansion parameters from lattice NRQCD," Phys. Rev. D **69**, 094512 (2004) [arXiv:hep-lat/0305024].

[45] N. Tsutsui *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Continuum limit of proton decay matrix elements in quenched lattice QCD," presented at 21st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2003), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 15-19 Jul 2003; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 284 (2004) [arXiv:hep-lat/0309139].

[46] N. Tsutsui *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Lattice QCD calculation of the proton decay matrix element in the continuum limit," Phys. Rev. D **70**, 111501 (2004) [arXiv:hep-lat/0402026].

[47] S. Aoki, "Unquenched QCD simulation results," plenary talk at 18th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2000), Bangalore, India, 17-22 Aug 2000; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **94**, 3 (2001) [arXiv:hep-lat/0011074].

[48] T. Kaneko, "Light hadron spectrum and quark masses," plenary talk at 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 133 (2002) [arXiv:hep-lat/0111005].

[49] C. Bernard *et al.*, "Panel discussion on the cost of dynamical quark simulations," prepared for 19th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2001), Berlin, Germany, 19-24 Aug 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **106**, 199 (2002).

[50] M. Battaglia *et al.*, "The CKM matrix and the unitarity triangle," based on the Workshop on CKM Unitarity Triangle (CERN 2002-2003), Geneva, Switzerland, 13-16 Feb 2002; arXiv:hep-ph/0304132.

[51] N. Yamada, "Heavy quark physics and lattice QCD," invited talk at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 93 (2003) [arXiv:hep-lat/0210035].

[52] N. Ishizuka, "$K \to \pi\pi$ decay amplitude on the lattice," invited talk at 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 84 (2003) [arXiv:hep-lat/0209108].

[53] C. Bernard, S. Hashimoto, D. B. Leinweber, P. Lepage, E. Pallante, S. R. Sharpe and H. Wittig, "Panel discussion on chiral extrapolation of physical observables," submitted to 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), Boston, Massachusetts, 24-29 Jun 2002; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 170 (2003) [arXiv:hep-lat/0209086].

[54] T. Onogi, "Lattice QCD results on B physics," prepared for 5th KEK Topical Conference: Frontiers in Flavor Physics (KEKTC5), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 20-22 Nov 2001; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **111**, 75 (2002).

[55] K. I. Ishikawa, "Hadron spectrum from dynamical lattice QCD simulations," presented at 22nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2004), Batavia, Illinois, 21-26 Jun 2004; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **140**, 20 (2005) [arXiv:hep-lat/0410050].

[56] S. Hashimoto, "Recent results from lattice calculations," Plenary talk at 32nd International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 04), Beijing, China, 16-22 Aug 2004; Int. J. Mod. Phys. A **20**, 5133 (2005) [arXiv:hep-ph/0411126].