

機関番号：12102

研究種目：基盤研究 (S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18104005

研究課題名 (和文) 超並列クラスタ計算機による計算素粒子物理学の展開

研究課題名 (英文) Computational Particle Physics  
with Massively Parallel Cluster Computer

研究代表者

宇川 彰 (UKAWA AKIRA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：10143538

研究成果の概要 (和文)：

素粒子の強い相互作用は量子色力学 QCD で記述される。本課題では、計算アルゴリズムの抜本的改善と超並列クラスタ計算機 PACS-CS による計算力の増強を組み合わせることにより、格子 QCD 分野の 1980 年代以来の懸案であった物理点シミュレーション、即ち、軽いクォーク (u, d, s) の真空偏極効果を完全に取り入れたシミュレーションを実現し、ハドロン質量スペクトルの精密計算等による QCD の検証及び強い相互作用の多様な物理現象の解明を行った。さらに、ヘリウム原子核の QCD に基づく直接計算等を行い、原子核研究の新たな方向を開拓した。

研究成果の概要 (英文)：

The strong interaction of hadrons are described by QCD. Combining the revolutionary improvement of the simulation algorithm and an increase of computing power provided by PACS-CS parallel cluster computer, physical point simulation including the full dynamical vacuum polarization effects of u, d, s quarks with physical masses was achieved. This has solved the long-standing goal since 1980's, and has enabled the verification of QCD with a precision calculation of the hadron mass spectrum and other physical quantities. New direction of nuclear research was explored by a calculation of helium nucleus directly based on QCD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2007 年度	18,600,000	5,580,000	24,180,000
2008 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2009 年度	18,600,000	5,580,000	24,180,000
2010 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
総計	70,600,000	21,180,000	91,780,000

研究分野：計算素粒子物理学

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：素粒子標準模型, 強い相互作用, ハドロン, クォーク, 量子色力学, 格子場理論, 数値シミュレーション, 計算物理

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子とその相互作用に関する我々の描像は、強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) と、弱電磁相互作用を記述する

Weinberg-Salam 理論からなる素粒子標準模型に集約される。標準模型の検証と予言の抽出には、特に QCD を中心として、超高速計算機による数値シミュレーションが極めて重要な役割を果たしてきた。筑波大学を中心と

する我々のグループは、超高速計算機の開発・製作にまで踏み込んだアプローチを開拓し、計算機開発とそれを用いた素粒子物理学研究の両面において、高い水準の成果を挙げて来た。特に、1996年には格子 QCD 計算を主目的の一つとする超並列計算機 CP-PACS を完成させ、その飛躍的計算力（ピーク性能 0.61 Tflops は当時世界最高速）の集中使用により、ケンチ近似でのハドロンスペクトルの決定をはじめとする多大な進歩を達成した。

このような成功を受けて、筑波大学計算科学研究センターでは、2005 年度から 3 カ年計画で超並列クラスタ計算機 PACS-CS の開発・製作が開始された。本研究課題は、PACS-CS により格子 QCD 研究を飛躍的に進めることを目的に構想されたものである。

## 2. 研究の目的

本研究課題においては、CP-PACS を持っても解決できなかった格子 QCD の最大の課題、即ち、軽いクォーク (u, d, s) 全ての真空偏極効果 (対生成・対消滅効果) を取り入れた「完全な格子 QCD シミュレーション」の実現を目標とした。特に、CP-PACS に比べて約 20 倍となる PACS-CS の飛躍的に強化された計算能力と、最新の計算アルゴリズムの適用による計算効率の高度化を組み合わせ、自然界の値にできるだけ近い u, d, s クォーク質量でのシミュレーションの実現を目指した。これにより、ハドロンスペクトルを出発点とするハドロンの性質と構造の基本的な解明、弱電磁相互作用において CP 非保存の解明を中心とした素粒子標準模型の確立、さらには高温・高密度でのクォーク・グルオン・プラズマの解明等、1980 年代以来追求されて来た素粒子物理の重要課題に区切りとなる成果を目指した。

さらに、ハドロン単体の解明を超えて、ハドロンの多体系即ち原子核自体を格子 QCD に基づき直接研究する方向についてもその開拓を試みることにした。

以上のような研究目的のもとに、以下の具体的テーマを中心とした課題とした。

### (1) 強い相互作用基礎理論としての QCD の精密検証

ハドロンの基底状態質量スペクトルの精密計算を行い数%精度での QCD の検証を目指す。

### (2) 強い相互作用基本定数の決定

QCD 結合定数  $\alpha_s$  及び軽いクォーク質量  $m_u, m_d, m_s$  の決定を行う。

### (3) ハドロン物理の重要課題

$\eta'$  中間子と位相励起の関係、 $\rho \rightarrow \pi\pi$  等の崩壊現象と共鳴状態、ハドロン構造関数の決定等、QCD をクォーク模型と峻別するハドロン物理の課題の解明を目指す。

### (4) CP-非保存の解明を中心とする素粒子標

## 準模型の確立

c, b クォークを含む重いハドロンの弱い相互作用崩壊諸量を求め、Cabibbo-小林-益川のクォーク混合行列への制限の精密化を図る。

## (5) クォーク・グルオン・プラズマの物理

RHIC 実験等の現象論的解析で重要な状態方程式の系統的計算を行う。

## 3. 研究の方法

従来のシミュレーションでは  $\pi$  中間子質量を 500MeV 程度まで軽くすることが限界であり、物理的質量 135MeV までの外挿の不定性が、信頼性の高い結果を確立する上で重大な問題であった。本課題では 2006 年度に稼働を始めた超並列クラスタ PACS-CS の計算能力と、同じく 2005 年頃に Luescher 等により提唱され始めていた最新の領域分割 HMC 計算アルゴリズムの適用による計算効率の高度化により、現実に近い極めて軽い u, d, s クォークによるシミュレーションを行い、それによって生成されるグルオン配位上で多様な物理量を計算・分析する。

## 4. 研究成果

### (1) 物理点での格子 QCD 計算の実現

本課題の準備研究では、 $\pi$  中間子質量を従来の 500MeV から 200MeV 程度まで下げることができると予測した。石川健一と蔵増嘉伸を中心として、研究開始後 2 カ年にわたり考える殆ど全てのアルゴリズム改善と PACS-CS 上での実計算チューニングを重ねた結果、世界的に使われている典型的な問題規模 (格子間隔  $a=0.1\text{fm}$ , 空間物理サイズ  $L=3\text{fm}$ , 格子サイズ  $32^3 \times 64$ ) において、物理点にほぼ等しい  $\pi$  中間子質量  $m_\pi=155\text{MeV}$  のシミュレーションを世界で初めて実現した (雑誌論文⑧)。

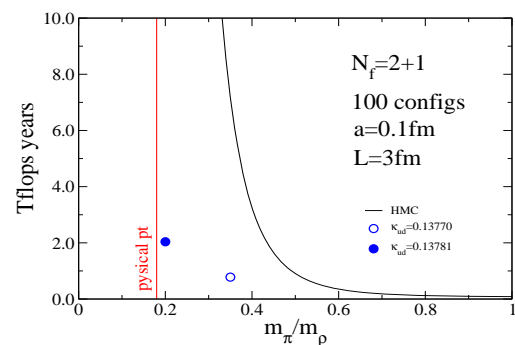


図1 演算量の改善結果

図1に、単純 HMC で予想された計算量の急激な増大 (実線) と、本課題で領域分割 HMC 計算アルゴリズムにより実現した劇的な改善 (青丸及び白丸) を示す。縦軸の単位 Tflops \* year は実効 1Tflops の計算機を用いて 1 カ年かかる計算量、縦の赤線は物理点を示す。

本課題で実現した改善は以下の理由による：①領域分割 HMC の分子動力学ステップにおいて、最も計算時間のかかるクォーク長波長側の寄与を分離することで、0(10)倍の加速が実現できたこと、②当該寄与を計算するために必要な Dirac 演算子の逆行列計算において、低エネルギーモードの分離 (deflation) や初期ベクトルの最適化 (chronological inverter) 等の工夫を加え、Dirac 演算子の固有値分布によらず高速・安定に逆行列を求めることを可能としたこと。

$\pi$  中間子質量  $m_\pi=155\text{MeV}$  は実験値  $m_\pi=135\text{MeV}$  に近いとはいえ 15% ずれており、数%精度の計算には不十分である。このずれはカレントクォーク質量のずれに起因する。数学的には、この問題は、二つの  $\pi$  中間子質量値に対するカレントクォーク質量のディラック演算子の行列式の比を、物理量を表す演算子に乗ずることによって補正できる。この方法を数値アルゴリズムとして開発・実用化し (reweighting の方法)、同方法を用いて実験値  $m_\pi=135\text{MeV}$  の直上でのシミュレーションを実現した (雑誌論文⑤)。

以上の二つの成果は、クォーク質量を出来るだけ実験値に近づけるとの当初目標を大きく上回り、従来の格子 QCD 計算の弱点であったクォーク質量に関する外挿を不要のものとし、物理点直上で自然界の QCD の量子揺らぎそのものを生成し計算する立場を現実のものとした。

## (2) 格子 QCD における物理成果

### ① 強い相互作用基礎理論としての QCD の精密検証

(1) に記した格子間隔  $a=0.1\text{fm}$ 、空間物理サイズ  $L=3\text{fm}$ 、格子サイズ  $32^3 \times 64$  のシミュレーションにおいて、u, d, s クォークからなる中間子・重粒子の基底状態の質量を求めた。クォーク質量に関する外挿のために良く使われるカイラル摂動論 (ChPT) について詳しい分析の結果、ChPT は s クォークには質量が大きすぎて適用できないこと、一方 u, d クォーク質量については、中間子に対しては良く成り立っているが、重粒子に対しては収束半径が物理点の狭い領域に限られている事などが強く示唆されている (雑誌論文⑦)。

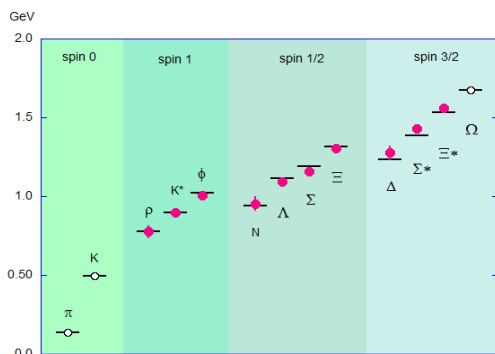


図 2 ハドロンの質量スペクトル

図 2 に物理点での質量スペクトル結果を示す。棒が実験値、赤丸が格子 QCD の予言であり (白丸の  $\pi$ , K,  $\Omega$  の質量値はインプットとして使用) 良く一致している (雑誌論文⑧)。

### ② 強い相互作用基本定数の決定

QCD 結合定数  $\alpha_s$  は自然界の基本定数の一つである。谷口裕介を中心として、Schroedinger 汎関数の方法を u, d, s クォーク ( $N_f=3$ ) の場合に適用し  $\alpha_s$  を求める計算を行った。図 3 に様々な実験による値 (白丸) と本課題の結果 (赤丸)  $\alpha_s(M_Z)=0.12047^{+94}_{-267}$  (MS bar くりこみスキームでの値) (雑誌論文⑥) を示す。両者は整合しており且つ格子 QCD による値は実験よりも小さな誤差で決まっている点が注目される。本課題で得た結果は、理論的に課題の残る staggered quark 作用による結果とも整合している。

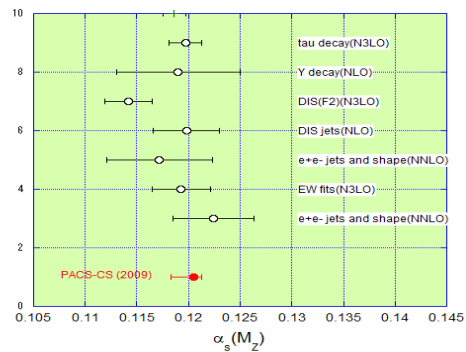


図 3 強い相互作用結合定数

軽いクォーク質量  $m_u$ ,  $m_d$ ,  $m_s$  についても、格子上の裸の質量と連続時空でのくりこまれた質量の関係を与えるくりこみ定数を Schroedinger 汎関数の方法により非摂動的に定めた。格子間隔  $a=0.1\text{fm}$  でのクォーク質量結果は、 $(m_u+m_d)/2=2.8(3)\text{MeV}$ ,  $m_s=86.7(2.3)\text{MeV}$  である (雑誌論文③)。

### ③ ハドロンの物理の重要課題

図 1 に示した粒子の中には  $\rho$  や  $\Delta$  のように崩壊する共鳴粒子が含まれる。共鳴粒子の質量は空間サイズが有限の格子でのエネルギーシフトと崩壊チャンネルでの位相差の関係から求めることができることが理論的に知られている。石塚成人を中心とする研究においてこの方法を適用した計算を行い、 $\rho$  中間子の質量と崩壊幅を求めた。格子間隔  $a=0.1\text{fm}$ 、 $\pi$  中間子質量  $m_\pi=300\text{MeV}$  での崩壊幅の結果は  $\Gamma=152(28)\text{MeV}$ 、実験値  $146.2(0.7)\text{MeV}$  と良く一致している (学会発表④)。

$\eta-\eta'$  問題については、吉江友照を中心として up-down sector と strange sector についての対角化により、固有状態とその質量を分

離する方法を確立した (学会発表⑫).

形状因子はハドロンの内部構造を探るプローブとして実験的にも理論的にも多くの研究が行われてきた. 特に  $\pi$  中間子の電磁形状因子  $F(q^2)$  とそれから決まる荷電半径  $r^2=6dF(q^2)/dq^2$  ( $q^2=0$ ) は  $\pi$  中間子質量の減少と共に対数的な増大が予想されることから興味を引いて来た. Oanh Hoanh Nguyen を中心とした計算により  $m_\pi=300\text{MeV}$  までの形状因子と荷電半径が求められ, 物理点でのデータを説明するにはカイラル摂動論では二次の項まで必要であること, 物理点  $m_\pi=135\text{MeV}$  での計算には統計揺らぎを充分におさえるために, 格子物理サイズ  $L=6\text{fm}$  程度が必要であることが見出された(雑誌論文①). 図4に  $\pi$  中間子荷電半径に対する本課題 (赤丸) 及び他グループの結果及び物理点での実験値 (赤スター) との比較を示す. 本課題の物理点への外挿値は誤差が約 10% と大きいが実験値と整合している.

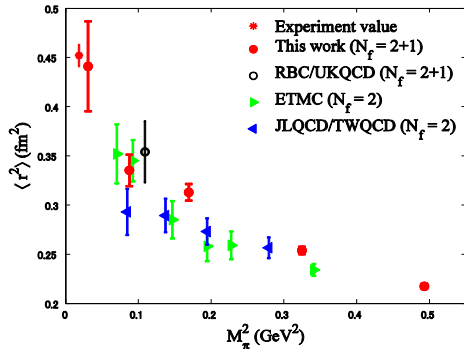


図4  $\pi$  中間子荷電半径

#### ④ CP-非保存の解明を中心とする素粒子標準模型の確立

重いクォークの物理は標準模型の基本である CKM 行列の決定に重要である. 滑川裕介を中心として, 本課題で生成したグルオン配位及び既に計算されている軽い  $u, d, s$  クォーク質量を物理点直上に調節するための reweighting の因子を用い, 青木・蔵増の開発した相対論的な重いクォーク作用によってチャームクォークを含む中間子の質量スペクトル及び崩壊定数等を求めた. チャーモニウム及び D 中間子の質量スペクトルは 1-2% 以内で実験値と一致している. D 中間子及び  $D_s$  中間子の崩壊定数については, 後者は良い一致を示しているが, 前者は  $2\sigma$  のずれがある. ここ数年注目された  $D_s$  中間子の崩壊定数の実験値と格子 QCD の予言値のずれは本課題の計算では見られない (学会発表⑥).

#### ⑤ クォーク・グルオン・プラズマの物理

有限温度 QCD の研究はゼロ温度情報を必要とする. 金谷和至達は, ゼロ温度でのシミュ

レーションを最大限に活用するために, 時間方向の格子サイズ  $N_t$  を変えて系の温度  $T=1/a N_t$  を変化させ, トレースアノマリーの期待値の積分と組み合わせて状態方程式 (エネルギー密度と温度の関係及び圧力と温度の関係) を求める方法を発展させている (学会発表③). 軽い 3 種類のクォーク  $u, d, s$  を取り入れた状態方程式の計算は従来は理論的基礎付けに課題の残る staggered quark 作用のみで行われてきたが, 本課題の用いている理論的基礎付けの明確な Wilson-clover 作用に基づく状態方程式が得られつつある.

#### (3) 空間サイズ $L=6\text{fm}$ 物理点計算の実現

本課題当初の目標は, 従来からの典型的な空間サイズである  $L=3\text{fm}$  であった. しかし, 上記(1)に記したとおり, 物理点直上での計算が早期に実現できたことから, 計画後半では目標を一段高く設定しなおし, 様々の物理量を求める上で望ましい空間サイズ  $L=6\text{fm}$  での物理点計算を目指した. この計算には予想を超える困難があったが, 格子間隔  $a=0.1\text{fm}$  の場合の  $64^4$  格子について, 本課題期間中に予定の統計数 1000  $\tau$  を生成することが出来た.

図5にハドロンの質量の計算値と実験値の比を示す.  $\pi$  中間子の質量 (最左データ) は実験値より約 13% 軽くなっている. このように軽いクォーク質量と大きな格子サイズで領域分割 HMC アルゴリズムが安定に動作することは大きな収穫である. reweighting 法によりクォーク質量を物理点直上に引き戻す計算と物理量の計算が現在並行して進められ, 順調に進行している.

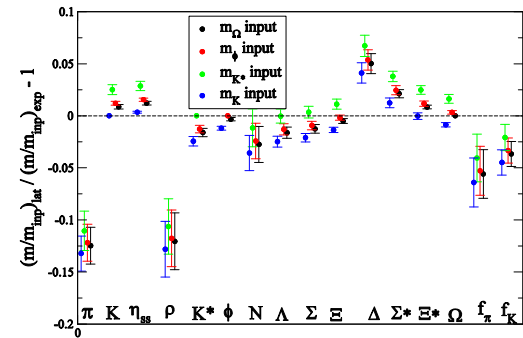


図5  $L=6\text{fm}$  格子計算でのハドロンの質量の計算値と実験値の比

#### (4) 格子 QCD に基づく原子核研究

原子核は陽子と中性子の集合体として永らく理解されてきたが, 陽子・中性子は 3 つのクォークからなる束縛状態であるから, 原子核をクォークのレベルから出発し, QCD に基づいて理解するアプローチが考えられる. このアプローチは, 現象論的な核子ポテンシャルの適用可能性が自明ではない中性子過剰核等で重要であり, またクォーク質量が変

化した場合に原子核の様相はどのように変化するかの疑問にも応えることができる。

QCDによる原子核の直接計算は三つの困難を持つ。核子当たりの束縛エネルギーが10MeV程度と小さい事、質量数が増大すると共に格子サイズを大きくする必要があり、原子核の伝播関数を求める上でクォークの縮約数が階乗で増大することである。山崎剛たちは、最も簡単な原子核であるヘリウムについて、クエンチ近似・パイ中間子質量  $m_\pi = 700\text{MeV}$  での計算を行った。格子サイズ  $L$  を 3fm, 6fm, 12fm と変化させて無限体積の極限値を求め、自由核子4個のエネルギーを下回ることを見出した。これは、ヘリウムが束縛状態として存在することを示す。この結果は物理点計算ではないが、QCDによる原子核の直接計算への道を開拓する成果である。

格子QCDにより核力ポテンシャルを計算し、このポテンシャルを用いて原子核の研究を行う方法もある。青木慎也を中心としてこのアプローチが進められているが、本課題ではこの方法によりHバリオンがu, d, sが縮退している極限で束縛状態として存在している事が見出された(雑誌論文②)。

#### (5) グルオン配位の国際共有

本課題で生成されたグルオン配位は、グリッド技術を用いたデータ国際共有の仕組み International Lattice Data Grid (ILDG) に逐次登録され、世界の格子QCD研究者に提供されている。既に登録された配位を用いて物理量の計算を行っているグループが複数あり、このような枠組みによるリソース共有の有効性を示す結果となっている。

#### (6) 本課題の成果の世界的位置付けと今後

本課題で実現した、軽いu, d, sクォークの真空編極効果を完全に取り入れた物理点シミュレーションは、1980年来の格子QCDの懸案を世界で初めて解決したものであり、世界的にも最先端の結果である。また、QCDに基づく原子核研究も世界をリードする結果である。一方で、複数の格子間隔でのシミュレーションを実施し、格子間隔がゼロの連続極限での物理予言を引き出す点ではドイツを中心とした研究グループがこれを強力に押し進め、本課題に先んじた成果を出している。今後は、神戸で建設が進められている次世代スパコン「京」の利用等により欧米に対抗して研究を進めて行く必要がある。

その際の研究の焦点の一つは、本課題が開拓した、自然界での強い相互作用そのものを扱う意味づけを有する物理点シミュレーションを中心に据えることであり、物理テーマとしては、原子核の直接研究と並んで、有限温度、特に有限密度での強い相互作用の研究を進める方向であろう。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計17件)

- ① “Electromagnetic form factor of pion from  $N_f=2+1$  dynamical flavor QCD”, O. H. Nguyen, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, N. Ukita, JHEP 104:122, 2011. 査読有
- ② “Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD”, T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, Takumi Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), Phys. Rev. Lett. 106(2011) 162002. 査読有
- ③ “Non-perturbative renormalization of quark mass in  $N_f = 2+1$  QCD with the Schrodinger functional scheme”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, JHEP1008:101, 2010. 査読有
- ④ “Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD”, T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Phys. Rev. D81:111504, 2010. 査読有
- ⑤ “Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, Phys. Rev. D81:074503, 2010. 査読有
- ⑥ “Precise determination of the strong coupling constant in  $N(f) = 2+1$  lattice QCD with the Schrodinger functional scheme”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, JHEP 0910:053, 2009. 査読有
- ⑦ “SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD”, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys. Rev. D80:054502, 2009. 査読有
- ⑧ “2+1 Flavor Lattice QCD toward the Physical Point”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys. Rev. D79, 034503, 2009. 査読有

[学会発表] (計 54 件)

- ① “Progress in lattice QCD”, Y. Kuramashi, 35th Int. Conf. High Energy Physics, PoS ICHEP2010:545, 27 July 2010, Paris, France.
- ② “Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD”, S. Aoki, 35th Int. Conf. High Energy Physics, PoS ICHEP2010:362, 23 July 2010, Paris, France.
- ③ “Finite Temperature QCD on the Lattice-Status 2010”, K. Kanaya, XXVIII Int. Symp. Lattice Field Theory, PoS LATTICE2010:012, 17 June 2010, Villasimius, Sardinia, Italy.
- ④ “Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations”, N. Ishizuka, XXVIII Int. Symp. Lattice Field Theory, PoSLATTICE2010:108, 15 June 2010, Villasimius, Sardinia, Italy.
- ⑤ “Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD”, T. Yamazaki, XXVIII Int. Symp. Lattice Field Theory, PoS LATTICE2010:021, 17 June 2010, Villasimius, Sardinia, Italy.
- ⑥ “Charmed mesons in lattice QCD”, Y. Namekawa, KEK workshop on HEAVY QUARK PHYSICS IN QCD, 7 September 2009, Tsukuba, Japan.
- ⑦ “Quantum chromodynamics on the lattice 2009”, A. Ukawa, Int. Conf. Lepton Photon Interactions at High Energies, pp. 51-64, 17 August 2009, Hamburg, Germany.
- ⑧ “PACS-CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point”, Y. Kuramashi, Proc. XXVI Int. Symp. Lattice Field Theory, PoS LATTICE2008:018, 18 July 2008, Williamsburg, Virginia, USA.
- ⑨ “Recent algorithm and machine developments for lattice QCD”, K.-I. Ishikawa, Proc. of XXVI Int. Symp. on Lattice Field Theory, PoS LATTICE2008:013, 16 July 2008, Williamsburg, Virginia, USA.
- ⑩ “ $N_f=2+1$  dynamical Wilson quark simulation toward the physical point”, Y. Kuramashi, Proc. of XXV Int. Symp. Lattice Field Theory, PoS LATTICE2007:017, 30 July 2007, Regensburg, Germany.
- ⑪ “Hadron interactions from lattice QCD”, S. Aoki, XXVth Int. Symp. Lattice Field Theory, PoS

LATTICE2007:002, 3 August 2007, Regensburg, Germany.

- ⑫ “An estimate of the eta and eta’ meson masses in  $N_f=2+1$  lattice QCD”, T. Yoshie, XXIV Int. Symp. Lattice Field Theory, PoSLATTICE2006:204, 25 July 2006, Tucson, Arizona, USA.

[その他]

ホームページ:

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宇川 彰 (UKAWA AKIRA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 10143538

### (2) 研究分担者

金谷 和至 (KANAYA KAZUYUKI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 80214443

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 30192454

吉江 友照 (YOSHIE TOMOTERU)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授

研究者番号: 40183991

石塚 成人 (ISHIZUKA NARUHITO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授

研究者番号: 70251030

蔵増 嘉伸 (KURAMASHI YOSHINOBU)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授

研究者番号: 30280506

谷口 裕介 (TANIGUCHI YUSUKE)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師

研究者番号: 60322012

大川 正典 (OKAWA MASANORI)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 00168874

石川 健一 (ISHIKAWA KEN-ICHI)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 60334041

佐々木 潔 (SASAKI KIYOSHI)

筑波大学・計算科学研究センター・研究機関研究員

研究者番号: 80400696

滑川 裕介 (NAMEKAWA YUSUKE)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号: 00377946