5 各研究部門の報告

I. 素粒子物理研究部門

1. メンバー

教授	藏増 嘉伸、青木 慎也（客員研究員）、金谷 和至（共同研究員）
准教授	石塚 成人、谷口 裕介、吉江 友照、根村 英克、山﨑 剛（共同研究員）
助教	大野 浩史（国際テニュアトラック）
研究員	浮田 尚哉、齋藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介
学生	大学院生 6 名、学類生 0 名

2. 概要

当部門では、数理物質系物理学域との密接な連携のもと、格子QCD (Quantum ChromoDynamics：量子色力学）の大型シミュレーション研究を推進している。当部門の研究者の大半が参加する主要プロジェクトであるHPCI戦略プログラム分野５研究開発課題1「格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定」は、2015年度で終了した。2016年秋からJCAHPC（最先端共同HPC基盤施設：筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織）においてOakforest-PACS（ピーク演算性能25PFLOPSの超並列クラスタ計算機、「京」を超える国内最高性能システムとなる見込み）が稼働予定であり、これに向けてPACS Collaborationを組織し、準備研究を開始している。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、2015年度で終了したHPCI戦略プログラムの後継として、2016年度から「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」に関するアプリケーション開発・研究開発が始まった。現在9つの重点課題が設定されており、9番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、http://www.jicfus.jp/jpに詳しい。

3. 研究成果

【1】 HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題（藏増、青木、石塚、根村、山崎、谷口、浮田、佐々木、滑川）

分野５「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して４つの研究開発課題

が設定されており、そのうちの一つが「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」である。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、アイソスピン対称性の破れの効果を取り入れた計算や、低エネルギーのハドロン構造計算を意味する。他方、マルチスケール化とは、格子 QCD を用いた原子核の直接構成によってその束縛エネルギーを求めたり、あるいは核子間の有効ポテンシャルを調べたりすることを意味する。前者は、山崎・藏増を中心としたグループによって推進されており、後者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチである(後述)。

(1) 「京」で生成された配位を用いた基本物理量計算

「京」では、DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法を用いて、96^4 の格子サイズ、0.084 fm 程度の格子間隔を持つ、2+1 フレーバー ($m_u=m_d\neq m_s$) QCD のゲージ配位を生成した。この配位の最大の特徴は、約$(8.1\ \mathrm{fm})^3$という従来にない圧倒的な大きさの空間体積である。その最大の利点は、複数の核子から原子核を直接構成することが可能になることや、離散化された運動量の刻み幅が細かくなることによって、ハドロン形状因子の運動量空間における精密な解析が可能となることである。配位生成は 2014 年度初めに終了し、HA-PACS (計算ノード数 332、GPU 部ピーク演算性能 1.048 Pflops、CPU 部ピーク演算性能 0.118 Pflops) を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を行ってきた。2015 年度は、ハドロン質量、クォーク質量、擬スカラー中間子崩壊定数などの基本的な物理量の計算に対して時空間並進対称性を利用した統計精度の向上を目指した。図 1 は物理点でのハドロン質量計算の最終結果を実験値と比較したものである。ここでは、クォーク質量 ($m_u=m_d\neq m_s$) と格子間隔を決めるための 3 つの物理量として、π 中間子質量 (m_π)、K 中間子質量 (m_K)、Ω バリオン質量 (m_Ω) を採用している。安定粒子(強い相互作用で崩壊しない) は実験値と誤差の範囲で一致しているのに対して、不安定粒子(強い相互作用で崩壊する ρ や Δ など) は、誤差の範囲を超えて実験値との有意なズレが見て取れる。これは、現在採用しているハドロン質量の計算方法が不安定粒子に対しては有効でないことを表しており、これほど明確に実証された例は世界で初めてである。この他、ハドロン質量の計算と並行して、擬スカラー中間子の崩壊定数、カイラル摂動論における低エネルギー定数、核子のシグマ項などの計算も実行し、大変興味深い結果を得ている (論文 B-1)。

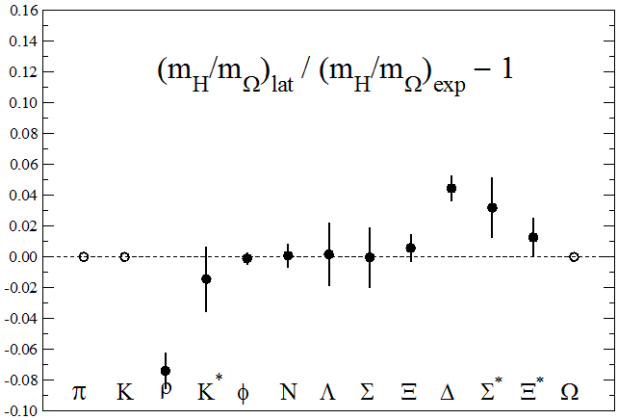

図 1：2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られたハドロン質量（Ω バリオン質量で規格化されている）と実験値との比較。白抜きシンボルはクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

【2】 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成（藏増、山﨑）

藏増、山﨑は理研計算科学研究機構（AICS）の宇川副機構長との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクェンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバーQCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。ただし、この計算は π 中間子質量 0.5 GeV 相当のクォーク質量を用いたものであり、物理点（π 中間子質量 0.14 GeV に相当）よりもかなり重い。そのため、物理点へ向けたクォーク質量依存性を調べるために、広島大学石川健一准教授を共同研究者に加え、π 中間子質量 0.3 GeV 相当のクォーク質量での計算を遂行した。この研究成果は、本年度、学術論文に掲載された（論文 A-1、B-5）。この成果を踏まえ、「京」で生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。^{3}He 原子核の束縛エネルギーに対応する有効エネルギー差の中間結果を図 2 に示す。物理点での計算では統計誤差を抑えることが非常に難しいため、現段階では統計的に有意な結果は得られていないが、今後統計誤差を小さくするための計算を継続していく。

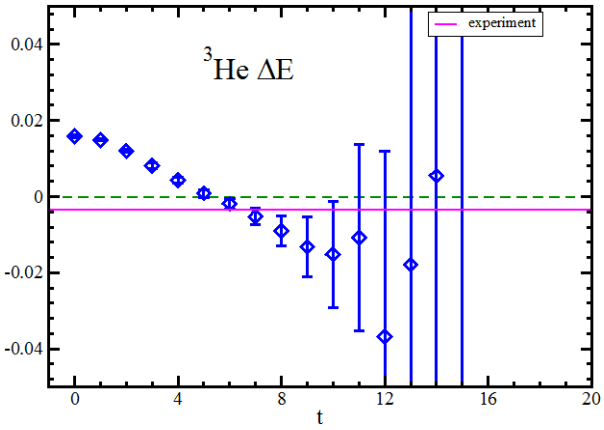

図 2：^{3}He 原子核の有効エネルギー差（格子単位）。横軸は虚時間、実線は実験値。大きな虚時間領域で、有効エネルギー差が定数になれば、その値が束縛エネルギーに対応する。

【3】 格子 QCD を用いた核子構造研究（藏増、山崎）

陽子と中性子（核子）はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを用いた計算が必要である。これまでに格子QCDを用いて、核子構造に関係する核子形状因子の研究が行なわれてきたが、非常に良い精度で測定されている実験結果を再現できていない。この実験値との不一致の主な原因は、計算に用いられたクォーク質量が現実のものよりも大きいためであると考えられている。

藏増、山崎は、広島大学石川健一准教授、東北大学佐々木勝一准教授、理研計算科学研究機構（AICS）宇川副機構長とともに、PACS Collaborationにおいて、この原因を取り除いた計算である、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ（π中間子質量145 MeV）での核子形状因子計算を行なった（論文B-5）。図3は電気的核子形状因子$G_E(q^2)$（図には規格化されたものが示されている）の中間結果である。これまでの計算結果とは異なり、実験値に良く一致した結果が得られている。今後もこの計算を進め、磁気的形状因子や軸性カレントに関係する形状因子の研究を行なっていく予定である。

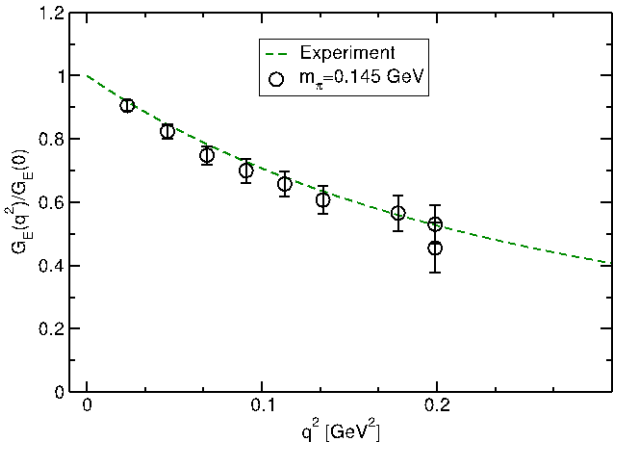

図3：電気的核子形状因子。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す。

【4】 K 中間子崩壊振幅の研究（石塚、吉江）

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、かつ理論の検証において極めて重要な問題が残されている。K 中間子崩壊のアイソスピンチャネルにおける ΔI=1/2 則の解明と、CP 非保存パラメータ（ϵ'/ϵ）の理論からの予測である。これらの問題には、K 中間子が二つの π 中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を数値計算し、問題の研究を行った。π 中間子質量 m_π=280 MeV のもとで、終状態の π 中間子が運動量をもたない場合の計算を完成させた（論文 A-2）。この計算により、ΔI= 1/2 則の兆候を見ることができた。CP 非保存パラメータ（ϵ'/ϵ）に関しては統計誤差が非常に大きく、計算の改善が必要であることが分かった。

この研究をもとに、計算を運動量をもつ現実の崩壊の場合に拡張し、信頼性の高い振幅を求める研究を開始した。現在、崩壊振幅の計算のために、新たなゲージ配位を生成し、本格計算に向けた試験計算を行っている。

【5】 有限温度・有限密度 QCD の研究（WHOT-QCD Collaboration：金谷、谷口）

金谷、谷口らは、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。改良 Wilson クォークによる N_F=2+1 QCD の物理点近傍における状態方程式のための配位生成を継続して推進するとともに、状態方程式の評価に必要なベータ関数を QCD の多変数空間で精度よく決定する手法として、多重点再重み付け法によるベータ関数評価の試験を行った。さらに、Gradient Flow 法を用いた有限温度状態方程式の評価を、動的クォークを含む QCD で実行する最初の研究を開始し、試験研究の結果を得た。

(1) 多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

有限温度・有限密度QCDの状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算するためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線（Line of Constant Physics：LCP）」（同一の物理系を様々な格子間隔で表現）と、LCP上でパラメータの格子間隔依存性をあらわす「ベータ関数」の情報が必要である。QCDは、ゲージ結合定数（β）と複数のクォーク質量（κ）や化学ポテンシャル（μ）を基本パラメータとして持つが、多次元のパラメータ空間でLCPやベータ関数を精度よく評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法（multi-point reweighting法）」を検討し、密度ゼロのN_F=2 QCDの場合に試験研究を行った（論文B-6、A-3）。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法（reweighting法）がよく使われるが、有限温度・有限密度QCDの研究で要求されるような、パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図4左に、改良プラケットPのκ依存性を示す。黒丸は３つのシミュレーション点における観測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点

のデータを使って再重み付け法を使って計算したPの κ 依存性の予言をあらわす。パラメータを大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低く、このままLCPやベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータの大きな変化に対応できない事による（「重ねあわせ問題」）。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュレーションデータを統合して再重み付けする。図4左に、3つのシミュレーションを合わせて多重点再重み付け法により計算した結果を赤線で示す。観測結果（黒丸）をスムースに繋ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精度の高い結果が得られた。これにより、LCPとベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域での精度の高い測定が可能となる。それに基づいて計算したN_F=2 QCDのLCPとベータ関数を、図4右と図5に示す。

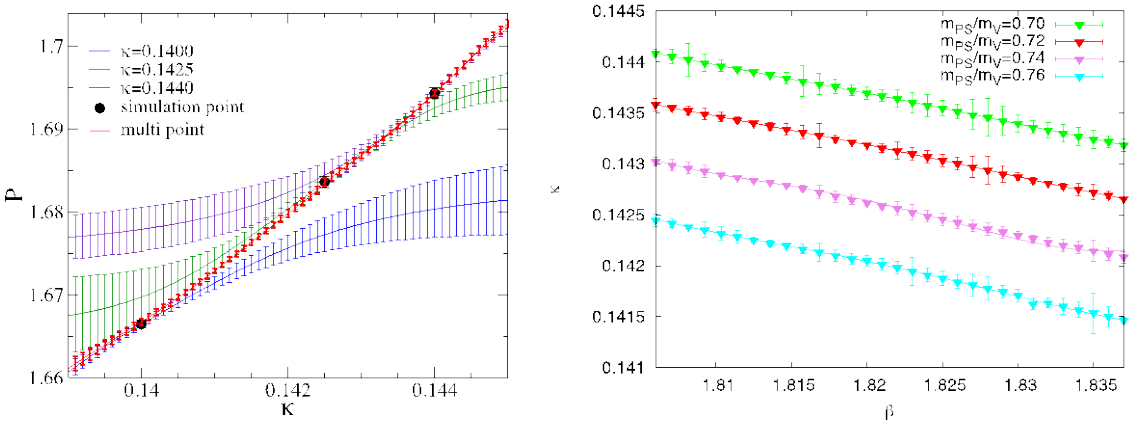

図4：N_F=2 QCDにおける多重点再重み付け法の研究（論文A-3）。左図：改良プラケットP=$c_0W^{1\times1}+2c_1W^{1\times2}$の期待値の β=1.825における κ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。「重ねあわせ問題」のために、パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。観測結果をスムースに繋ぎ、広いパラメータ領域で精度の高い計算が可能となる。右図：m_{PS}/m_Vの結果から求めた等物理線（LCP）。m_{PS}/m_Vが1に近いほどクォーク質量が大きい場合に相当する。

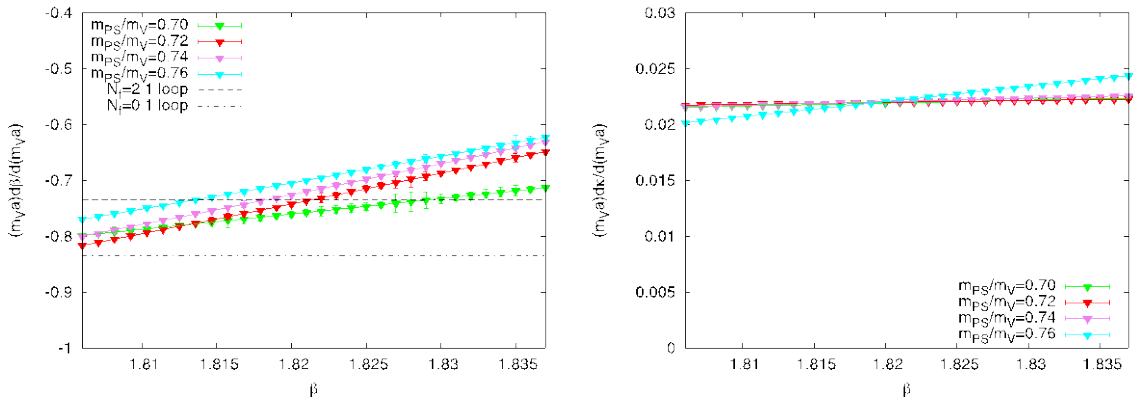

図5：多重点再重み付け法による、N_F=2 QCDのベータ関数a(dβ/da)（左図）とa(dκ/da)（右図）。m_Va を近傍で結合パラメータの2次フィットした結果に基づいて計算したもの。左図の破線は、N_F=0と2の場合の摂動１次の結果（論文A-3）。

(2) N_F=2+1 物理点 QCD と有限密度 QCD

この手法を応用してN_F=2+1物理点QCDや有限密度QCDを研究するための準備も進めている（論文B-7）。

我々が開発した固定格子間隔アプローチに基づき、PACS-CSのゼロ温度シミュレーションと同じシミュレーション・パラメータを使って、T=140-500 MeVに相当する有限温度配位を系統的に蓄積している。これまでに生成した有限温度配位と、PACS-CSが公開しているゼロ温度配位やreweighting factorを用いて、Plaquette期待値、Polyakov loop期待値、さらに状態方程式の計算で必要となるQCD作用のcoupling parameter微分の試験計算をおこない、期待する振る舞いを確認した（図6左）。これを発展させ、多重点再重み付け法やGradient Flow法を用いた物理点でのベータ関数の評価が次の課題である。

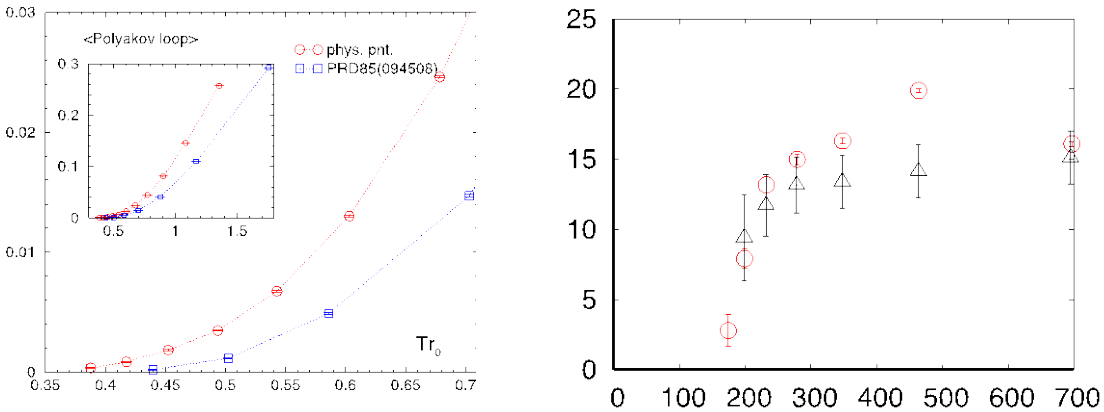

図6：左図：物理点における有限温度QCDの配位で計算したPolyakov loop期待値の温度（Sommer scale r_0で規格化）依存性。以前の計算による比較的重いクォーク質量での結果も示す。クォーク質量が軽くなると相転移温度が下がる事が分かる（論文A-3）。右図：Gradient Flow法によるN_F=2+1 QCD状態方程式（中間結果）。縦軸はϵ/T^4、横軸はT [MeV]。赤丸がGradient Flow法の結果で、黒三角はT-積分法による以前の結果。

(3) Gradient Flow 法による N_F=2+1 QCD 状態方程式

近年QCD熱力学量の新しい計算方法としてgradient flowを用いた方法が注目を浴びている。この方法では繰り込まれたエネルギー運動量テンソルを格子上で直接計算することが可能になり、エネルギー密度などの状態方程式を計算することができる。さらにgradient flowによるクーリングの効果によって、熱力学量における誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の積分法をベースとした計算手法に比べて、高精度の計算が可能になることが期待されている。

これまでにクェンチ近似ではgradient flowを用いた計算が行われており、その有効性が示されている。動的クォークを含む作用でのgradient flowの定式化は、M. Lüscherにより行われており、full QCDでのエネルギー運動量テンソルの評価方法もH. MakinoとH. Suzukiの論文で開発されている。さらに、カイラルオーダーパラメータや位相数の評価もgradient flowにより容易になると期待されており、相構造などの研究にも大きな進展が期待される。我々は、これらを使って動的クォークを含む(2+1)-flavor QCDにおけるgradient flowを用いたQCD熱力学量の計算を目的として、研究を進めている。そのための計算コードを、Bridge++をベースに開発した。

最初のステップとして、m_{PS}/m_V=0.65のやや重いクォーク質量領域でN_F=2+1 QCDの状態方程式の研究を開始した。固定格子間隔法を採用し、CP-PACS Collaborationで生成したゼロ温度配位と同じシミュレーション・パラメータを用い、T=170-700MeVに相当する有限温度配位を生成している。図6右に、gradient flowを用いた状態方程式計算の中間結果を示す。Makino-Suzukiによる状態方程式（エネルギー・運動量テンソル）の評価方法では、flow time tについてゼロの極限を外挿する必要があるが、N_t≈4の高温格子以外では、安定した結果を得ることが出来た。図6右で、赤丸がGradient Flow法によるエネルギー密度の結果で、黒三角は、T-積分法により我々が以前計算した結果である。Gradient Flow法による右端のデータ（N_t=4）とその次のデータ（N_t=6）では、t→0の外挿に不定性が有るが、その系統誤差はエラーバーに含まれていない。連続極限以外でGradient Flow法とT-積分法が一致する必然性はないが、有限の格子上で両者がほぼ一致していることは、方法の有用性を示唆している。

Gradient Flow法による計算時間は、T-積分法より大きく削減されている。次の目標は、異なる格子間隔での同様の計算を行い、連続極限を調べることである。最終的には、物理点での有限温度配位を用いたエネルギー運動量テンソルの測定を目指している。

【6】 有限温度・有限密度 QCD の研究（BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration：大野）

大野は、国際テニュアトラック助教として米国Brookhaven National Laboratory（BNL）に長期滞在し、Frithjof Karsch教授を中心とするBNL-Bielefeld-CCNU Collaborationに参加して有限温度・有限密度QCDの共同研究を行っている。

(1) 格子 QCD による保存電荷の揺らぎと相関の研究

閉じ込め・非閉じ込め相転移の前後では、系の自由度がハドロンからクォークに変化する。保存電荷の揺らぎやそれらの間の相関は、この自由度の変化に敏感であり、相転移の性質を詳細に調べるのに有用である。

大野は、BNL-Bielefeld-CCNU Collaborationに参加し、2+1フレーバーのHighly Improved Staggered Quark作用を用いた格子QCDシミュレーションにより、様々な保存電荷の揺らぎ及びそれらの間の相関に関する共同研究を行った。ここで、シミュレーションは複数の格子間隔にて行い、連続極限をとった。まず、300-700 MeVの高温領域において、u、d、sクォークに対する対角及び非対角クォーク数感受率を4次のオーダーまで計算した。そして、得られた結果をいくつかの摂動計算と比較し、互いによく一致することを示した（論文A-5）。また、温度と化学ポテンシャルに関するテイラー展開を用いて、総バリオン数及び総電荷の揺らぎの平均と分散を計算した。そして、その結果をSTAR及びPHENIX実験の結果と比較し、バリオン化学ポテンシャルが0の極限でのfreeze-out温度を決定するとともに、初めて、freeze-out lineの曲率に制限を与えた（論文A-6）。

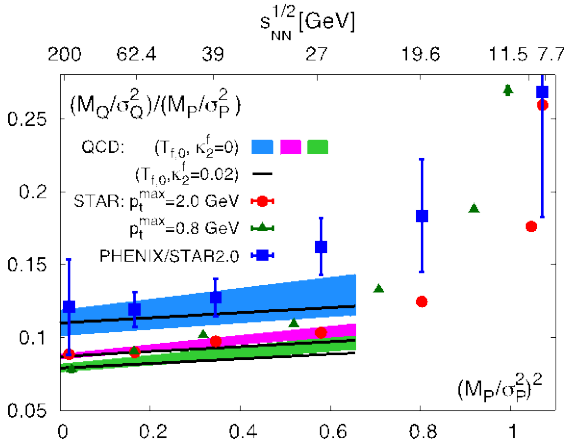

図7：総電荷揺らぎの平均と分散の比(M_Q/σ_Q^2)と総陽子数揺らぎの平均と分散の比(M_P/σ_P^2)の実験値（シンボル）と格子QCD計算（バンド及び線）との比較。

(2) 有限温度格子 QCD によるクォーコニウム消失と重クォーク輸送の研究

クォーコニウムはチャームやボトムといった重クォークとその反クォークの束縛状態である。RHIC やLHC での相対論的重イオン衝突実験におけるクォーコニウム生成量の抑制は、クォーク・グルオン・プラズマ（QGP）生成を示す重要なシグナルの一つであり、クォーコニウムの高温媒質中での振る舞いを理論的に理解することは、実験結果を説明する上で非常に重要である。また、QGPの流体力学的な性質も注目されており、流体モデルに基づく実験結果の説明には、QGP中での重クォーク輸送現象の理論的理解が必要不可欠である。

大野は、York大のAnthony Francis氏、Bielefeld大のOlaf Kaczmarek氏、Bern大のMikko Laine氏及びJülich計算センターのThomas Neuhaus氏らと共に、最大$192^3\times48$という非常に大

きな格子を用いてpure SU(3)の格子QCDシミュレーションを行い、連続極限における色電荷相関関数を計算した。そして、この相関関数に対して様々なモデルに基づくフィットを行い、スペクトル関数を計算し、そのゼロ周波数近傍の振る舞いから重クォーク運動量拡散係数（κ）を見積もった。その結果、相転移温度の約1.5倍の温度（T）において、κ/T^3=1.8-3.4という値を得た（論文A-7）。また、Heng-Tong Ding氏、Olaf Kaczmarek氏、Swagato Mukherjee氏及びHai-Tao Shu氏らとの共同研究により、相関関数からスペクトル関数を計算する方法として、確率論的な手法を導入し、クォーコニウムのスペクトル関数の計算に向けた様々な予備的計算を行った（論文B-8）。今後は、より詳細な系統誤差の検証や既存の方法との比較等と共に、様々な温度におけるクォーコニウムのスペクトル関数を計算し、クォーコニウムの消失温度や重クォーク拡散係数の推定を行う。

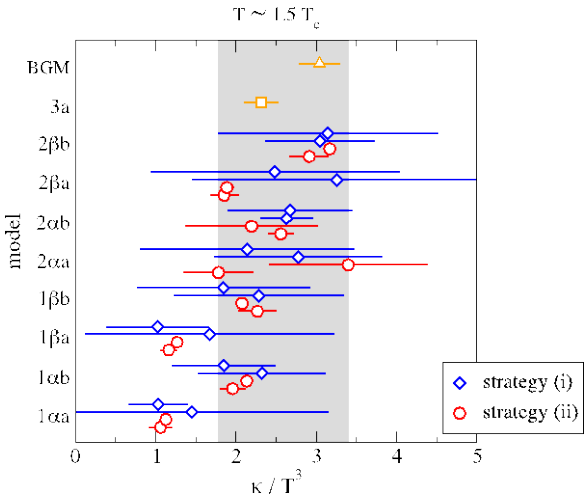

図8：様々なモデルに基づくスペクトル関数のフィットから得られた重クォーク運動量拡散係数の結果。灰色のバンドは最終結果を示す。

【7】 3 フレーバー・2+1 フレーバー有限温度 QCD における相構造（藏増）

温度 T とクォーク化学ポテンシャルμを関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。藏増は、理研計算科学研究機構（AICS）の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、O(a)改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、T、μ、クォーク質量m_qのパラメータ空間における 3 フレーバーQCD の臨界終線の決定に取り組んできた。先ず、最初のステップとして μ=0（密度ゼロ）における 3 フレーバーQCD における臨界終点を決定した（論文発表済）。われわれが用いた方法は、尖度（kurtosis）交叉法と呼ばれる有限サイズスケーリング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究は、世界で初めて 3 フレーバーQCD における臨界

終点の決定に成功したものであり、QCD の相構造を理解する上での非常に重要な礎石となっている。

次のステップは 3 フレーバーQCD から 2+1 フレーバーQCD への拡張であるが、われわれは先ず 3 フレーバーQCD の計算結果を用いた reweighting 法によって、3 フレーバーQCD の臨界終点近傍の臨界終線の振る舞いを調べた。ただし、今回は「時間方向」の格子サイズを N_T=6 に固定している。図 9 は、$(m_\pi)^2$-$(m_\eta)^2$ 平面における SU(3)対称点近傍の臨界終線の振る舞いをプロットしたものである。紫色の直線は SU(3)対称な点を表しており、それを横切る臨界終線の傾きは理論的に-2 になるはずであるが、われわれの結果も良い精度でそれを再現している。

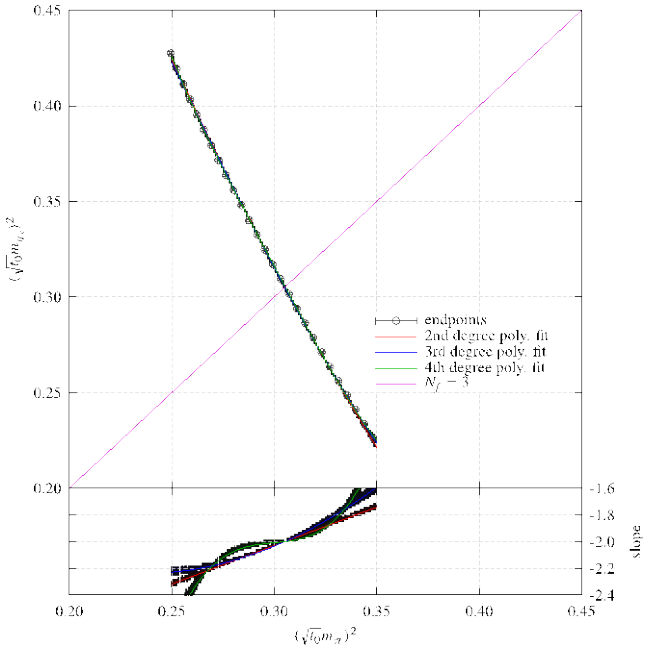

図 9：$(m_\pi)^2$-$(m_\eta)^2$ 平面における臨界終線。直線は SU(3)対称点（m_π=m_η）を表す。

【8】 有限密度 QCD の研究（谷口）

鈴木と谷口は阪大の中村純氏、立教大の岡将太郎氏らと共同でするカノニカル法を用いた有限密度QCDの研究を行った。

有限密度格子QCDには複素作用の問題、及びその派生としての符号問題と呼ばれる未解決の問題がある。この複素作用の問題を直接回避する方策として、カノニカル分配関数をフガシティー展開の係数として直接計算するカノニカル法と呼ばれる手法を採用した研究を行った。特に重いクォークに対して有効なhopping parameter展開を採用することで、広い温度領域でカノニカル分配関数の計算を行った。

物理量としては、クォーク数密度とその高次のキュムラントの計算を主に行った。特にクォーク数の揺らぎに相当する２次のキュムラントには$T<T_c$の低温側において相転移に特有な

ピーク構造が現れていることが見て取れる（図10）。更に２次と１次のキュムラントの比 $\langle N^2\rangle_c/\langle N\rangle$について計算を行った（図11）。これはハドロンレゾナンスガス模型及びクォークガス模型との比較が明確な量であるが、注目すべきポイントは、特に$T<T_c$の低温側での振る舞いである。低密度側ではハドロン模型の予言とよく一致している一方で、密度を上げて行くに従って、ハドロン模型からはずれて、クォーク模型の予言に近づいていく様子が見て取れる。高温側では一貫してクォーク模型の予言とよく一致していることと比較するとこれは著しい違いである。これは、低温側で密度を上げて行くに従って、QCD相図のクォークの閉じ込め-非閉じ込め相転移の境界をまたいで行く現象と考えられる。最後に２次のキュムラントに現れたピークの位置からQCDの相図を類推したものが図12である。

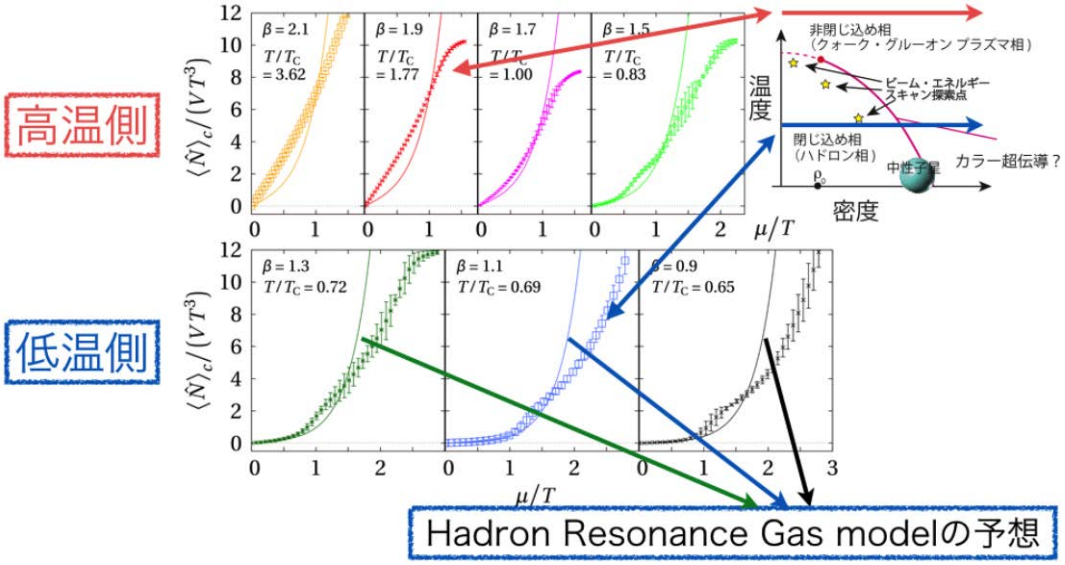

図 10：クォーク化学ポテンシャル μ/T の関数としてのクォーク数密度の２次キュムラント $\langle N^2\rangle_c/(VT^3)$。グラフは上から高温側：$\beta$=2.1（orange）、1.9（red）、1.7（magenta）、1.5（green）、1.3（dark green）、1.1（blue）、0.9（black）：低温側。

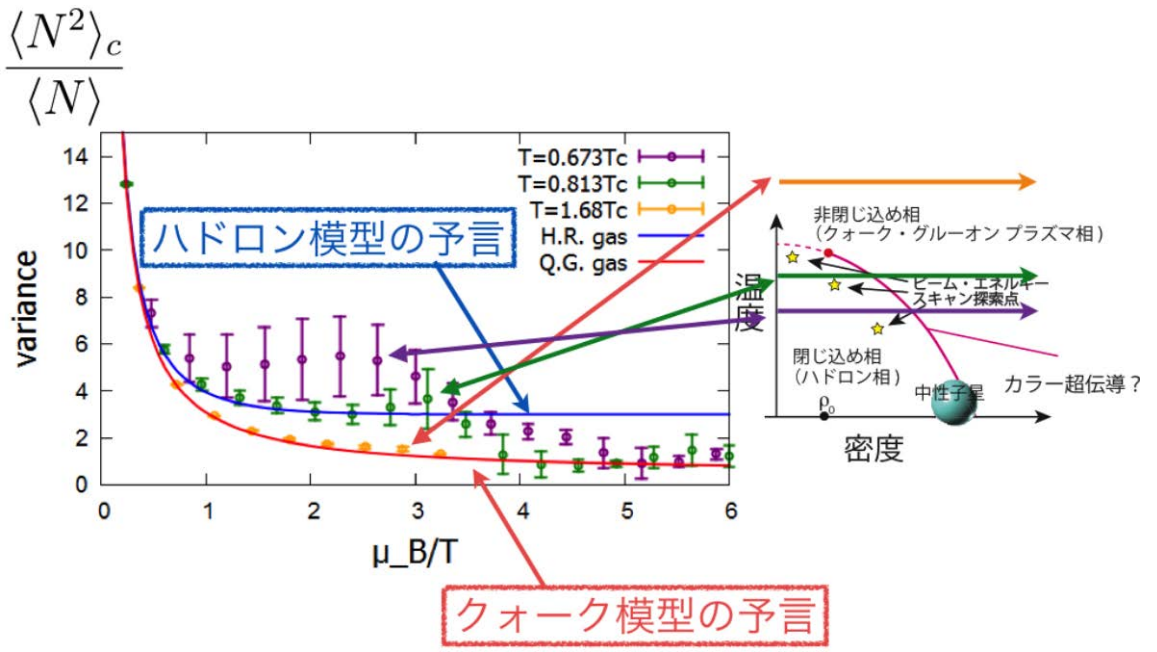

図 11：バリオン化学ポテンシャル μ_B/T の関数としてのクォーク数の２次キュムラントとクォーク数の比$\langle N^2 \rangle_c/\langle N \rangle$。ハドロンレゾナンスガス模型（青線）及びクォークガス模型（赤線）との比較を行っている。

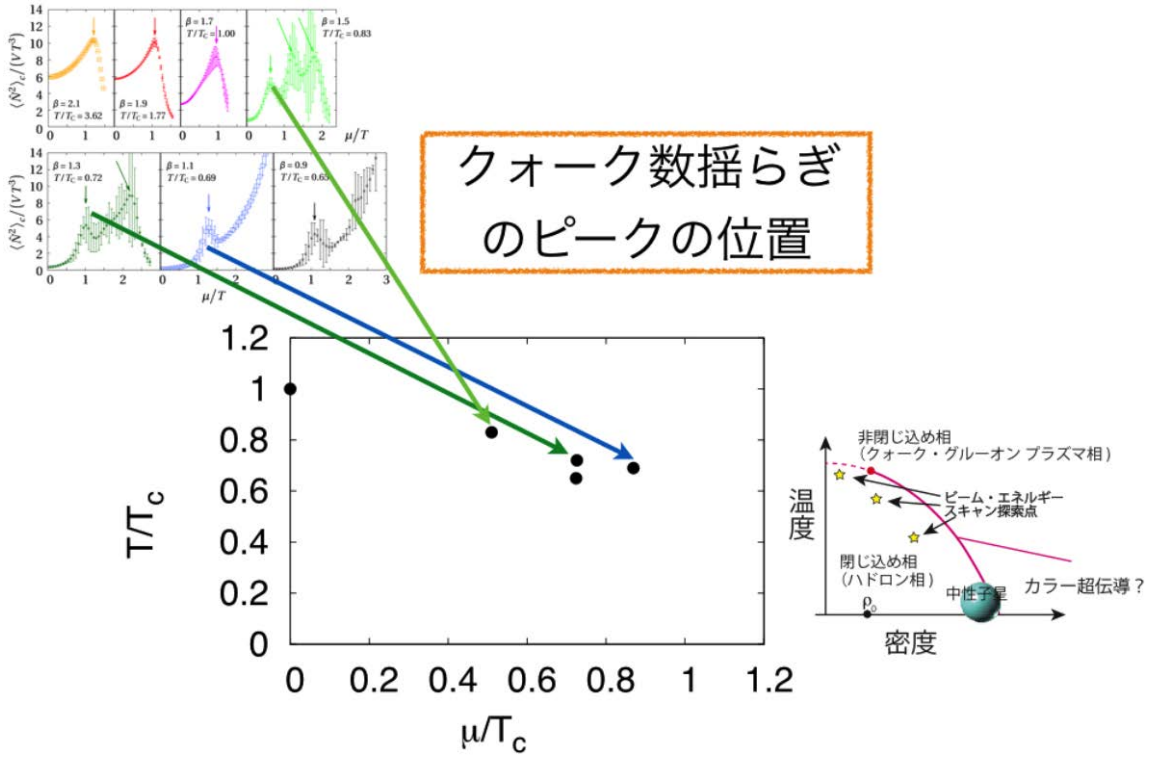

図 12：クォーク数揺らぎに現れるピークの位置から類推した QCD 相図。

【9】 テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究（藏増、齋藤）

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然の u、d、s クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。

これまで、藏増と理研計算科学研究機構（AICS）の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し（グラスマンテンソル繰り込み群）、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、θ 項が有る場合と無い場合の 1 フレーバーの 2 次元格子 Schwinger モデル（2 次元格子 QED）における相構造を調べた（論文発表済）。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である 4 次元 QCD への応用に向け、（i）非可換ゲージ理論への拡張、（ii）高次元モデルへの応用、（iii）物理量計算のための手法開発、という 3 つの課題に取り組む必要がある。2015 年度において特に進展があった研究は、テンソル繰り込み群を用いた 4 次元イジングモデルの解析である。図 13 は、1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度計算を表している。先ず、各 Dcut（テンソル繰り込み群において計算精度をコントロールするパラメータ）において、テンソル固有値の縮重度を調べることによって相転移温度を決定する。左図では Dcut=10 の例をプロットしている。その後、相転移温度の Dcut 依存性において収束の様子を調べることによって、最終的な相転移温度を決定する（右図）。青い横線はモンテカルロ法の結果を表しているが、テンソル繰り込み群の結果も近い値に収束していることがわかる。ただし、従来のモンテカルロ計算における最大格子サイズは 80^4 であり、今回のわれわれの計算における 1024^4 格子サイズに比べて非常に小さい。テンソル繰り込み群における計算コストの体積依存性は対数的であり、この点もモンテカルロ法にくらべて圧倒的な優位性を持つ特徴の一つである。

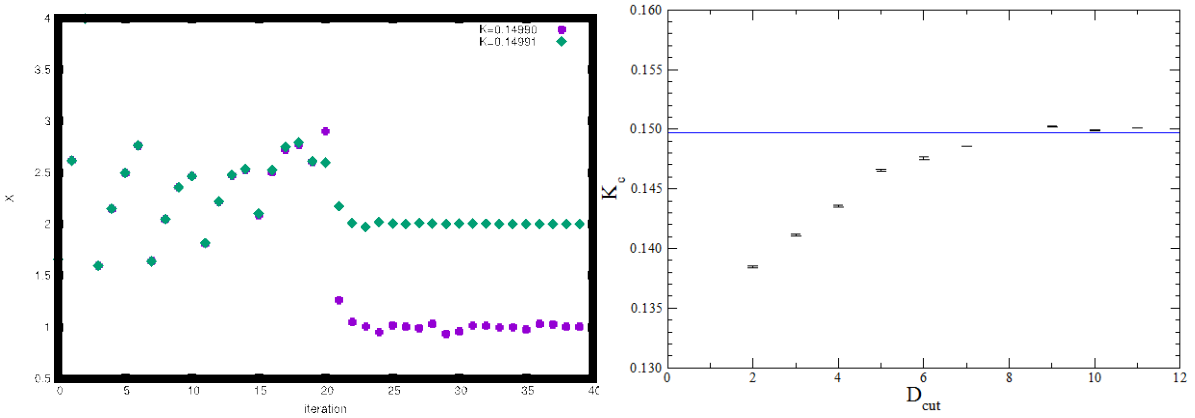

図 13：1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度の決定。左図：Dcut=10 におけるテンソルの固有値の縮重度による高温相（縮重度 1）と低温相（縮重度 2）の同定。右図：転移温度の Dcut 依存性。青い横線はモンテカルロ法による計算結果を表す。

【10】 素粒子標準模型を超えた理論の探索（山﨑）

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補である。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山﨑は名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構（KMI）を中心とした LatKMI Collaboration の研究者、山脇幸一特別教授、青木保道准教授らと共に、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行った。これまでの 4（論文 B-14）、8、12 フレーバーSU(3)ゲージ理論の研究から、8 フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性がある事を示した（論文 B-15）。その可能性を確かめるため、様々なハドロン質量（論文 B-16）、S パラメータ（論文 B-17）、トポロジカルチャージに関係した物理量（論文 B-18、B-19）を計算し、8 フレーバー理論の性質をより明確に理解するための研究を行った。

【11】 コンフォーマル理論の数値的研究（WMFQCD Collaboration：吉江）

素粒子標準模型を越える理論の候補であるウォーキングテクニカラー模型は、コンフォーマル対称性をもった理論をベースに構築されると考えられている。WMFQCD Collaboration（岩崎（筑波・KEK）、石川（広島）、中山（Walter Burke Institute）、野秋、Cossu（KEK）、吉江）は、QCD 的な場の理論（N_f 個の基本表現のフェルミオンが結合した SU(3)ゲージ理論）のコンフォーマル対称性に関する理論構造の解明を目的に研究を行っている。繰り込み群等に基づく理論的な考察と、それを検証する為の格子シミュレーションを研究手段としている。

前年度までに、「有限の IR cutoff を持つコンフォーマル理論」という、新概念を提唱し、その理論の特徴を明らかにしてきた。つまり、

- ゲージ結合定数が IR fixed point（赤外固定点）を持つ理論を、有限の IR cutoff を持つ時空（例えば、空間方向のサイズが有限な時空）上で定式化すると、IR cutoff が無い理論ではフェルミオン質量 m_f がゼロでのみ実現する conformal 対称性が、有限の m_f へ広がり、「閉じ込め相」とも「非閉じ込め相」とも異なる「conformal 領域」が存在すること、
- 「conformal 領域」での meson 伝搬関数 G(t)（空間運動量ゼロ）は、変形湯川型

$$G(t)\sim \mathrm{Cexp}(-mt)/t^{\alpha}$$

となる（閉じ込め相では指数関数型 $G(t)\sim \mathrm{Cexp}(-mt)$）こと、

- conformal 領域の真空は、空間方向の Polyakov Loop が非自明な Z(3)位相を持つ”twisted Z(3) vacuum”であること

を理論的・数値的に示した。（後二者は、conformal 領域の特徴。）QCD 的理論の理論構造としては、

- N_f=7、8、12、16 の系でコンフォーマル領域が存在することから、QCD 的理論（ゼロ温度）の conformal window は N_f=7-16 であること、
- N_f=2 の有限温度 QCD においても、高温相に conformal 領域が存在すること

などを明らかにした。

本年度は、ゼロ温度の QCD 的理論に対して、IR fixed point を同定する新手法を提案し、N_f=7、8、12、16 の格子シミュレーションで実際に IR fixed point を求めた（論文 A-10）。新手法は、繰り込み群に基づく。サイズ（IR cutoff）の異なる時空上の meson 伝搬関数に関する繰り込み群方程式から出発し、伝搬関数（から定義される有効質量 m(t)）のスケーリング則が導かれる。つまり、m(t)は、時間 t（と有効質量自身）をサイズでスケールすると、IR fixed point 上（m_f=0）では、サイズに依存しないユニバーサルな関数となる。この手法の検証のため、N_f=7、8、12、16 の理論に対して、Iwasaki ゲージ作用と Wilson フェルミオン作用を用いた格子シミュレーションを３つの格子サイズ $8^3\times32$、$12^3\times48$、$16^3\times64$ で、結合定数を変えながら行い、「特定の結合定数の時（のみ）、スケールした meson 有効質量がサイズによらない」ことを示した。つまり、IR fixed point を同定できた。伝搬関数のスケーリング則から、異常質量次元を求める事ができるが、数値的に意味のある結果を得るには、より大きなサイズの計算が必要であり、今後の課題である。

N_f=2 高温相のコンフォーマル的性質の解明についても進展があった(論文 A-11)。昨年度までは、時間方向（温度方向）のサイズ L_t が空間方向のサイズ L_s より大きい系に対して、conformal 領域の存在を示してきたが、正しい有限温度系である $L_t<L_s$ の系に対しても conformal 領域が存在する事を示した。具体的には、Polyakov loop と meson 有効質量を測定し、m_f=0 で、Z(3) twisted state が実現している事を示した。

今年度は、さらに domain wall quark を用いたシミュレーションによるコンフォーマル理論の研究も推進し、中間結果を、国際会議で報告した（論文 B-20）。Domain wall quark では、質量のチューニングが不要であり、カイラル対称性の破れ/回復の直接検証が可能である点で、Wilson quark の計算より優位である。計算はゼロ温度 N_f=8 で行い、Wilson quark に対して行ってきた前述の解析を行うとともに、ディラックスペクトル密度の解析から異常質量次元を見積もる試みも行っている。

【12】 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究（HAL QCD Collaboration：根村、佐々木）

陽子および中性子(核子) を結びつけ、原子核を構成している力(核力) は、現象論的には中間子交換によって生じると考えられているが、その起源をより基本的なクォーク・グルーオンの自由度に基づいて理解すること、とりわけ短距離核力における斥力芯の発現機構を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の一つである。根村、佐々木は、京都大学基礎物理学研究所青木教授、理化学研究所初田主任研究員らとHAL QCD Collaborationを結成し、2核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子QCDの数値シミュレーションで計算してきた。論文A-12では、PACS-CSによって生成されたゲージ配位のうち、格子間隔a=0.09 fm、空間体積L^3=(2.9 fm)^3、m_π≈700 MeV、m_Ω≈1970 MeVのものを用いて$^1S_0$チャネルのΩΩポテンシャルの計算を行った。論文A-13では、CP-PACS/JLQCDによって生成されたゲージ配位を用いて、空間体積L^3=(1.93 fm)^{3}におけるフレーバーSU(3)対称性が破れたクォーク質量（m_π/m_K=0.96、0.90、0.86）でのストレンジネスS=−2セクターの結合チャネルバリオン間ポテンシャルの計算を行った。以下では、格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定に関連して行われた2015年度の研究成果を紹介する。

（1）格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定は、京速計算機などの大規模な計算機資源を活用して計算が行われた。この研究課題には、ストレンジネスを持たない核力ポテンシャルと、ストレンジネスを持ったハイペロンポテンシャルの両方が含まれる。核力については、これまでに豊富な実験データに基づいて現象論的には精密に調べられているため、この研究課題で用いる方法によって、これまでの核力ポテンシャルに対する理解と矛盾しない結果が得られることを検証するという側面がある。一方、ハイペロンポテンシャルについては、実験データが限られている、もしくはほとんど実験からの情報が無いため、この研究課題で得られる結果は、従来の現象論的な模型とは異なり、パラメータフリーの予言を与えるという重要な成果が期待される。従って、貴重な計算機資源をできるだけ有効活用するために、2+1フレーバーの格子QCD 計算で引き出すことのできるアイソスピン対称性を持った八重項バリオン間相互作用の情報をすべて求められるように、以下に示す52チャネルの4点相関関

数を一度の計算ジョブで同時に計算するようにプログラムを準備した上で計算を開始している。

$$\langle pn\overline{pn}\rangle,$$

$$\langle p\Lambda\overline{p\Lambda}\rangle, \quad \langle p\Lambda\overline{\Sigma^+n}\rangle, \quad \langle p\Lambda\overline{\Sigma^0p}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^- n\overline{p\Lambda}\rangle, \quad \langle \Sigma^- n\overline{\Sigma^+n}\rangle, \quad \langle \Sigma^- n\overline{\Sigma^0p}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^0 p\overline{p\Lambda}\rangle, \quad \langle \Sigma^0 p\overline{\Sigma^+n}\rangle, \quad \langle \Sigma^0 p\overline{\Sigma^0p}\rangle,$$

$$\langle \Lambda\Lambda\overline{\Lambda\Lambda}\rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\overline{p\Xi^-}\rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\overline{n\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\overline{\Sigma^0\Sigma^0}\rangle,$$

$$\langle p\Xi^-\overline{\Lambda\Lambda}\rangle, \quad \langle p\Xi^-\overline{p\Xi^-}\rangle, \quad \langle p\Xi^-\overline{n\Xi^0}\rangle, \quad \langle p\Xi^-\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle, \quad \langle p\Xi^-\overline{\Sigma^0\Sigma^0}\rangle, \quad \langle p\Xi^-\overline{\Sigma^0\Lambda}\rangle,$$

$$\langle n\Xi^0\overline{\Lambda\Lambda}\rangle, \quad \langle n\Xi^0\overline{p\Xi^-}\rangle, \quad \langle n\Xi^0\overline{n\Xi^0}\rangle, \quad \langle n\Xi^0\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle, \quad \langle n\Xi^0\overline{\Sigma^0\Sigma^0}\rangle, \quad \langle n\Xi^0\overline{\Sigma^0\Lambda}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^+\Sigma^-\overline{\Lambda\Lambda}\rangle, \langle \Sigma^+\Sigma^-\overline{p\Xi^-}\rangle, \langle \Sigma^+\Sigma^-\overline{n\Xi^0}\rangle, \langle \Sigma^+\Sigma^-\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle, \langle \Sigma^+\Sigma^-\overline{\Sigma^0\Sigma^0}\rangle, \langle \Sigma^-\Sigma^-\overline{\Sigma^0\Lambda}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^0\Sigma^0\overline{\Lambda\Lambda}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Sigma^0\overline{p\Xi^-}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Sigma^0\overline{n\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Sigma^0\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Sigma^0\overline{\Sigma^0\Sigma^0}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^0\Lambda\overline{p\Xi^-}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Lambda\overline{n\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Lambda\overline{\Sigma^+\Sigma^-}\rangle. \qquad \langle \Sigma^0\Lambda\overline{\Sigma^0\Lambda}\rangle,$$

$$\langle \Xi^-\Lambda\overline{\Xi^-\Lambda}\rangle, \quad \langle \Xi^-\Lambda\overline{\Sigma^-\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Xi^-\Lambda\overline{\Sigma^0\Xi^-}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^-\Xi^0\overline{\Xi^-\Lambda}\rangle, \quad \langle \Sigma^-\Xi^0\overline{\Sigma^-\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Sigma^-\Xi^0\overline{\Sigma^0\Xi^-}\rangle,$$

$$\langle \Sigma^0\Xi^-\overline{\Xi^-\Lambda}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Xi^-\overline{\Sigma^-\Xi^0}\rangle, \quad \langle \Sigma^0\Xi^-\overline{\Sigma^0\Xi^-}\rangle,$$

$$\langle \Xi^-\Xi^0\overline{\Xi^-\Xi^0}\rangle.$$

2015年度中では、上記八重項に加えて、強い相互作用による崩壊チャネルの開かない（従って現在の方法で安全にポテンシャルを求められる）ΩΩチャネルも加えた大規模計算がすすめられた。データが膨大であるため解析もまだ進行中であるが、予備的な結果の一例として、ΛNの中心力及びテンソル力ポテンシャルを図14に示す。

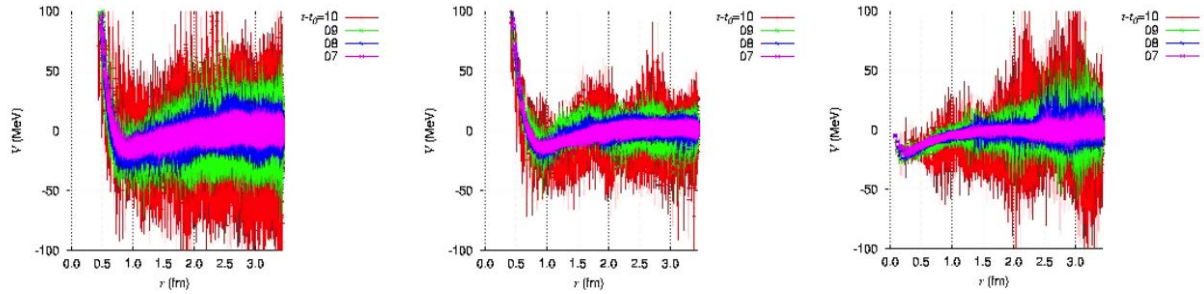

図14：体積$(96a)^4\approx(8.2\ \mathrm{fm})^4$、格子間隔$a\approx0.085$ fm、$(m_\pi, m_K)\approx(146, 525)$ MeVに対応するほぼ物理点上で計算された、ΛN−ΛN対角成分のポテンシャルを示す。横軸は2体のバリオン間の距離を表す。色の違いは格子上で測定された虚時間の違いを示している。左：$^1S_0$チャネルにおける中心力ポテンシャル。中央：$^3S_1$-$^3D_1$ チャネルにおける中心力ポテンシャル。右：$^3S_1$-$^3D_1$チャネルにおけるテンソル力ポテンシャル。

【13】 格子QCD 研究用データグリッドJLDG/ILDG の運用（吉江、山﨑、藏増）

JLDG（Japan Lattice Data Grid）は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子QCD研究拠点９箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供するSINET VPNで接続し、グリッドファイルシステムソフトウェアGfarmで束ねたファイルシステムである。どの拠点からアクセスしても同一のファイルシステムが見えるので、「ある拠点のスパコンで生成したデータ（格子QCD配位など）をJLDGに投入・蓄積し、別拠点で読み出して、その拠点のスパコンで再解析（物理量の計算）をおこなう」といったデータ共有を、容易におこなう事ができる。また、サブシステムとして、HPCI共用ストレージとの連携システムとILDG（International Lattice Data Grid）との接続システムを備えている（図15参照）。JLDGの運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当者、をメンバーとするJLDGチームが行っており、筑波大学からは、建部(高性能計算システム研究部門)、天笠（計算情報学研究部門）と吉江、山﨑が参加している。

JLDGは2005年に開発を開始し、2007年から運用している。JLDGは、一昨年度まではシステムの改良や新機能の実装をおこなって、その利便性が向上してきたが、昨年度からは、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。また、国内の複数の大きな研究グループが研究インフラとしてJLDGを使用している。この事から、JLDGが実用システムとして、一定の完成の域に達したと判断し、この段階でのシステムとその運用についての記録と国内外への広報の目的で、国際会議CHEP2015にてJLDGの総合報告をおこなった（論文B-22）。また、今年度は、以下のシステム増強と安定運用の為の活動をおこなった。

- ファイルサーバの増強:前年度28サーバ5.0PBから39サーバ7.5PBへ
- 管理機器更新（JLDG 2件、ILDG 2件）
- Gfarm更新（4回）
- SINET5への移行対応：一部拠点で1 Gbpsから10 Gbpsへ増速
- ファイルサーバの個別障害対応

ILDGは、世界5地域に構築されたLattice QCD用のデータグリッドを、Lattice QCDの基礎データ（配位）の共有を目的として、相互運用を可能にするGird of Gridsである。JLDGはILDGの日本地域グリッドである。また、日本からは、ILDGのboard memberとして藏増が、Metadata working group memberとして吉江が参加している。また、もうひとつのMiddleware working groupには、天笠がメンバーとして参加するとともに、吉江もオブザーバとして参加しユーザーサイドからの提言等をおこなっている。ILDGは、2007年の運用開始以来、細かな改良はあるものの、主要部分は安定した運用を続けている。

ILDGには、運用開始当初から「公開されている格子QCD配位アンサンブルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積できれば、それを用いて、その配位データの有用性を測る資料とな

りうるし、ひいては、データ共有の為のILDGの有用性を示す資料ともなりうる。この事は、格子QCD配位データに限った問題ではなく、多くの研究分野が、データの引用・被引用関係を把握するニーズを持っている。この様な背景の下で、学術論文の出版界で広く用いられている『DOI (Digital Object Identifier) 登録』の仕組みを研究データにも用いる試みが始まっている。ILDGでも、『格子QCDアンサンブルへのDOI登録』を行い、High Energy Physics 分野の最大の情報システムであるINSPIRE-HEPを用いて、アンサンブルの引用・被引用関係を把握できる仕組みを構築する提案がなされ、2015年4月のILDG workshopで、各地域グリッドで検討する事となった。この合意を受け、日本では、天笠、松古 (KEK) 、吉江が中心となって、DOI登録の体制面の検討 (DOI登録機関との協議、関係機関との協議とDOI登録実施体制とフローの検討) をおこなうとともに、DOI登録に必要な実作業 (Metadataとlanding pageのILDG ensemble/configuration metadataからの半自動生成) の試行に着手した。

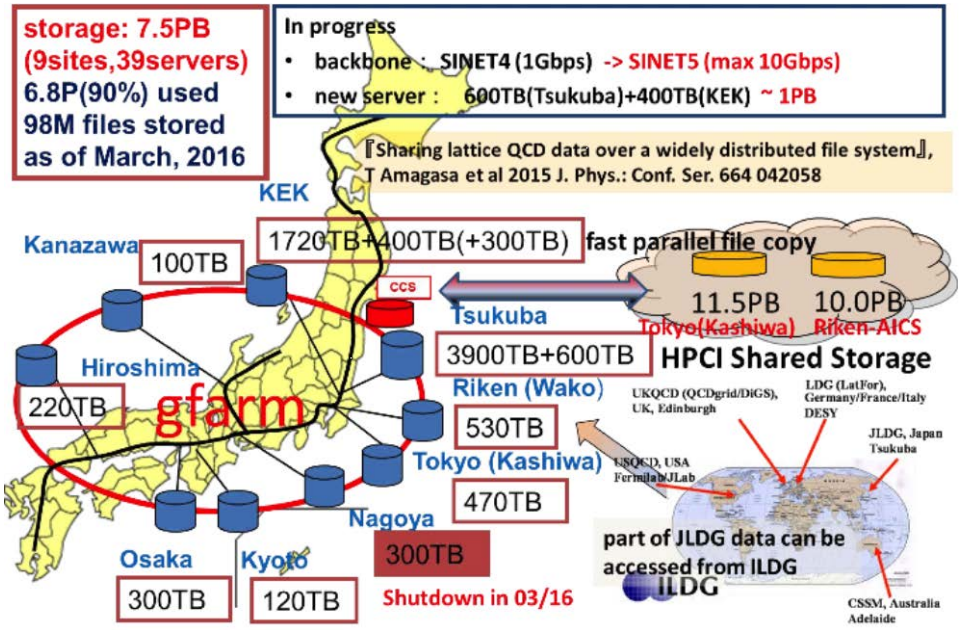

図15：JLDGの概略図。現在9サイト39サーバを運用している。

【14】 格子 QCD 共通コード開発（金谷、谷口、根村、浮田、滑川）

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++の開発を進めた（論文 B-23、B-24）。格子 QCD 共通コード Bridge++は、QCD を含む格子ゲージ理論シミュレーションのための汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリズムを適用可能で、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。2012 年 7 月に Bridge++ ver.1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (http://bridge.kek.jp/Lattice-code/)。素粒子理論グループからは、金谷、谷口、根村、浮田、滑川が参加している。

本年度は、一般化フェルミオンの追加、FFT 対応、XML 形式の導入などを行った。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.3.0 へのメジャーアップデートが 2015 年 10 月に実施された。

その後も、コードの細かい改定、改良が進められている。最新版は ver. 1. 3. 2 である。なお、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 9 本追加された。通算 13 本の論文が共通コードを元に発表されている。

4. 教育

【1】 修士論文

1. 賀数淳平、「N_f=2+1格子QCDによる微小な運動量移行でのπ中間子形状因子計算へ向けた基礎研究」

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

【1】 外部資金

1. 青木慎也（代表）、高性能汎用計算機高度利用事業費補助金、平成23年度採択、「HPCI戦略プログラム分野5『物質と宇宙の起源と構造』」、397,910千円
2. 青木慎也（代表）、一般受託研究、平成26年度採択、「ポスト『京』で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」重点課題⑨「宇宙の基本法則と進化の解明」、 46,924千円
3. 金谷和至（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造」、1,000千円
4. 藏増嘉伸（分担）、戦略的創造研究推進事業(CREST)、平成23年度採択、「ポストペタスケールに対応した階層モデルによる超並列固有値解析エンジンの開発」、1,000千円
5. 藏増嘉伸（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「テンソルネットワーク形式による格子ゲージ理論の研究」、3,500千円
6. 石塚成人（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「格子QCDによるK中間子崩壊の直接的CP非保存パラメータの決定」、4,100千円
7. 山崎剛（代表）、科学研究費補助金・若手研究(B)、平成25年度採択、「量子色力学を基にしたクォーク多体系としての原子核の研究」、700千円
8. 滑川裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明」、1,170千円

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, and Akira Ukawa, “Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD”, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 014501.
2. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Calculation of K→ππ decay amplitudes with improved Wilson fermion action in lattice QCD”, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 074503.
3. R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, and T. Umeda, “Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD”, Phys. Rev. D92, No.9 (2015) ref. 094507.
4. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus, and H. Ohno, “Critical point and scale setting in SU(3) plasma: An update”, Phys. Rev. D 91, No. 9 (2015) ref. 096002.
5. H.-T. Ding, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, and H.-P. Schadler, “Diagonal and off-diagonal quark number susceptibilities at high temperatures”, Phys. Rev. D92, No. 7 (2015) ref. 074043.
6. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, and M. Wagner, “Curvature of the freeze-out line in heavy ion collisions”, Phys. Rev. D93 (2016) ref. 014512.
7. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus, and H. Ohno, “Nonperturbative estimate of the heavy quark momentum diffusion coefficient”, Phys. Rev. D92, No. 11 (2015) ref. 116003.
8. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, “Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudoscalar meson mass for three-flavor QCD”, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 114511.
9. A. Nakamura, S. Oka, and Y. Taniguchi, “QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach”, Journal of High Energy Physics, 2016(2), pp. 1-19.
10. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, and T.Yoshié, “IR fixed points in SU(3) gauge Theories”, Phys. Lett. B748 (2015) 289.
11. K. -I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, and T. Yoshié, “Conformal Properties in High Temperature QCD”, arXiv:1511.03411 [hep-lat].

12. M. Yamada, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, and H. Nemura for HAL QCD Collaboration, "ΩΩ interaction from 2+1 flavor lattice QCD", PTEP 2015, No. 7, 071B01 (2015).
13. K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, and K. Murano for HAL QCD Collaboration, "Coupled-channel approach to strangeness S =-2 baryon-bayron interactions in lattice QCD", PTEP 2015, no. 11, 113B01 (2015).

B) 査読無し論文

1. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié,"2+1 Flavor QCD Simulation on a 96^4 Lattice", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 075.
2. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié,"Mass and Axial Current Renormalization in the Schrödinger Functional Scheme for the RG-Improved Gauge and the Stout Smeared O(a)-Improved Wilson Quark Actions", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 271.
3. H. Suno, Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, Y. Futamura, A. Imakura, and T. Sakurai,"Eigenspectrum Calculation of the Non-Hermitian O(a)-Improved Wilson-Dirac Operator using the Sakurai-Sugiura Method", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 026.
4. Hirokazu Kobayashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yoshinobu Kuramashi,"Optimization of Lattice QCD with CG and Multi-Shift CG on Intel Xeon Phi Coprocessor", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 029.
5. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, "Light Nuclei and Nucleon Form Factors in N_f=2+1 Lattice QCD", Proceedings of Science (LATTICE 2015) 081.
6. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration),"Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state", Proceeding of Science (LATTICE 2014) 222.
7. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, and K. Kanaya,"Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 209.

8. H. Ohno, H.-T. Ding, S. Mukherjee, O. Kaczmarek, and H.-T. Shu, “Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 175.
9. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa,“Phase structure of N_f=3 QCD at finite temperature and density by Wilson-Clover fermions”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 145.
10. N. Nakamura, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, S. Takeda, and A. Ukawa,“Towards the continuum limit of the critical endline of finite temperature QCD”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 160.
11. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki, and Y. Taniguchi, “Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 165.
12. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki, and Y. Taniguchi, “Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 168.
13. R. Fuluda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki, and Y. Taniguchi, “Beating the sign problem in finite density lattice QCD”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 208.
14. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), “SU(3) gauge theory with four degenerate fundamental fermions on the lattice”, arXiv:1512.00957.
15. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), “Walking and conformal dynamics in many-flavor QCD”, arXiv:1601.02287.
16. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), “Lattice study of the scalar and baryon spectra in many-flavor QCD”, arXiv:1510.07373.
17. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration),

"S-parameter and vector decay constant in QCD with eight fundamental fermions", arXiv:1602.00796.

18. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), "Topological insights in many-flavor QCD on the lattice", arXiv:1510.05863.
19. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), "Topological observables in many-flavour QCD", arXiv:1601.04687.
20. J. Noaki, G. Cossu, K-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, and T. Yoshié, "Study of the conformal region of the SU(3) gauge theory with domain-wall fermions", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 312.
21. S. Aoki, "Hadron Interactions from lattice QCD", EPJ Web Conf. 113 (2016) 01009.
22. T. Amagasa, S. Aoki, Y. Aoki, T. Aoyama, T. Doi, K. Fukumura, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, H. Jitsumoto, H. Kamano, Y. Konno, H. Matsufuru, Y. Mikami, K. Miura, M. Sato, S. Takeda, O. Tatebe, H. Togawa, A. Ukawa, N. Ukita, Y. Watanabe, T. Yamazaki, and T. Yoshié, "Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system", J. Phys.: Conf. Ser. 664 (2015) 4, 042058 (CHEP2015).
23. H. Matsufuru, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, and N. Ukita, "OpenCL vs OpenACC: Lessons from Development of Lattice QCD Simulation Code", Procedia Computer Science Volume 51 (2015) 1313.
24. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, and N. Ukita, "Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators", Proceeding of Science (LATTICE 2015) 040.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. Yoshinobu Kuramashi, 「Tensor Network Scheme for Lattice Gauge Theories」, XXVII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2015), (Indian Institute of Technology Guwahati, Assam, India, December 2-5, 2015).

2. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD at finite temperature」, New Progress in Heavy Ion Collision: What is Hot in the QGP (CCNU, Wuhan, China, October 5-9, 2015).
3. Hiroshi Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions at finite temperature」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, New York, USA, March 9-11, 2016).
4. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」, Lattice Nuclei Nuclear physics and QCD – Bridging the gap – (European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Italy, June 6-10, 2015).
5. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei and nucleon form factors in N_f=2+1 lattice QCD」, The 5th International Workshop on Lattice Hadron Physics (LHPV) (Conference Centre of the Cairns Colonial Club Resort, Australia, June 20-24, 2015).
6. Takeshi Yamazaki, 「Nucleon form factors and light nuclei in N_f=2+1 lattice QCD」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (Brookhaven National Laboratory, USA, March 9-11, 2016).
7. S. Aoki, 「Hadron Interactions from lattice QCD」, 21th International Conference on Few-Body Problems in Physics, (Chicago, USA, May 18-22, 2015).
8. S. Aoki, 「Nuclear forces from lattice QCD」, ECT* Workshop on "Lattice Nuclei Nuclear Physics and QCD - Bridging the gap", (Trento, Italy, July 6-10, 2015).
9. S. Aoki,「Comparative studies for baryon interactions with HAL QCD method and Lüscher's method」, Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics", (YITP, Kyoto, Japan, September 21-October 30, 2015).
10. S. Aoki, 「Recent developments and challenges in lattice QCD」, International Symposium "RIKKYO MathPhys 2016", (Rikkyo University, Tokyo, Japan, January 9-11, 2016).
11. S. Aoki,「New strategies with HAL QCD potential method」, Joint HAL QCD-CalLat mini-workshop on lattice QCD for NP, (LBL, Berkeley, USA, January 27-29, 2016).
12. S. Aoki, 「Hadron interactions at heavier quark masses in lattice QCD –Are deuteron and di-neutron bound ? – 」, YITP and IOPP Joint workshop on Heavy Ion Physics, (CCNU, Wuhan, China, February 20, 2016).

B) 一般講演

1. Y. Taniguchi, 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, NY, USA, March 9-11, 2016).
2. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
3. Hiroshi Ohno,「Charmonium and bottomonium spectral functions from lattice QCD at finite temperature」, The XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015) (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, September 27-October 3, 2015).
4. Asobu Suzuki, 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
5. Asobu Suzuki, 「Study of finite density phase transition with Canonical approach」, The 13th international eXtreme QCD conference (XQCD 2015), (CCNU,Wuhan, China, September 21-23, 2015).
6. Asobu Suzuki, 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The XXV international conference on ultra-relativistic heavy ion collisions (Quark Matter 2015), (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, September 27-October 3, 2015).
7. Asobu Suzuki, 「Calculation of Hadronic observable with Canonical approach in finite density lattice QCD」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016, (BNL, NewYork, USA, March 9-11, 2016).
8. Yusuke Taniguchi, 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2015), (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, July 14- 18, 2015).
9. Yusuke Taniguchi, 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach 」, XXV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTRA-RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS (Quark Matter 2015), (Kobe, Fashion Mart, Japan, September 27-October 3, 2015).
10. Yusuke Taniguchi, 「Study of high density lattice QCD with canonical approach」, Symposium on 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)', (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan, November 4-8, 2015).

11. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei and nucleon form factors in N_f=2+1 lattice QCD」, The 33rd International Symposium on lattice field theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Japan, July 14-18, 2015).
12. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei and nucleon form factors from lattice QCD」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015) (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Japan, November. 4-8, 2015).
13. Tomoteru Yoshié, 「Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system」 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2015) (Okinawa, Japan, April 13-17, 2015).
14. Tomoteru Yoshié,「MetadataWorking Group Report」23thWorkshop of International Lattice Data Grid (video conference hosted by CSSM, Adelaide, Australia, April 24, 2015).
15. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「An implementation of hybrid parallel CUDA code for the hyperonic nuclear forces」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, (Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
16. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「A fast algorithm for lattice hyperonic potentials」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, (Tohoku University, Sendai, Japan, Sep. 7-12, 2015).
17. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Hyperonic lattice QCD potentials and hypernuclear few-body problems」, YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), (YITP, Kyoto, Japan, September 21-Oct. 30, 2015).
18. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Algorithm, benchmarks, and hyperon potentials with strangeness S=−1 at almost physical point」, Symposium on 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)', (Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, November 4-8, 2015).
19. K. Sasaki for HAL QCD Coll.,「First results on baryon interactions from lattice QCD with physical masses (3) –Strangeness S=-2 two-baryon system–」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
20. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Results from HALQCD on light nuclei and exotic states」, EMMI workshop on anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC (CERN, Geneva, Switzerland, July 20-22, 2015).

21. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Coupled channel baryon-baryon interactions on the lattice」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), (Tohoku University, Sendai, Japan, September 7-12, 2015).
22. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Lattice QCD studies of baryon-bayon interactions and dibaryon states」, ELPH workshop C013 "Meson Production and Meson-Baryon Interaction", (Tohoku University, Sendai, Japan, September 12-14, 2015).
23. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Physical point lattice QCD simulation on the S=-2 baryon-baryon interactions」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), (Nara, Japan, November 4-8, 2015).
24. Y.Namekawa, 「Comparative study of topological charge in lattice QCD」, Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015) (Nara, Japan, November 4-8, 2015).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 大野浩史, 「Quarkonia at finite temperature」, 研究会「有限温度密度系の物理と格子QCDシミュレーション」（筑波大学計算科学研究センター, つくば, 2015年9月5日).
2. 吉江友照, 「計算物理学におけるデータシェアリングの現状と課題」, データシェアリングを利用した科学技術に関する勉強会（文科省, 東京、2015年5月13日).

B) その他の発表

1. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝, 「Gradient flowで見る有限温度QCD」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
2. 大野浩史, 「有限温度格子 QCD によるチャーモニウム及びボトモニウムスペクトル関数の研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
3. 谷口裕介, 「QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach」, JICFUS セミナー（京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2015 年 6 月 3 日).
4. 谷口裕介, 「カノニカル法で発見した格子 QCD の有限密度相転移現象の研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
5. 鈴木遊, 「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における相転移現象の研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日).

6. 鈴木遊, 「カノニカル法を用いた有限密度格子QCD における相転移現象の研究」, 原子核三者若手夏の学校（ホテルたつき, 愛知, 2015年8月17日-22日).
7. 鈴木遊,「カノニカル法を用いた有限密度格子QCDにおける物理量の計算とその体積依存性の研究」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
8. 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 宇川彰 for PACS Collaboration, 「改良されたウィルソンフェルミオン作用を用いた2+1フレーバーQCDによる核子形状因子の研究」, 日本物理学会2015年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015年9月25日-28日).
9. 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一, 浮田尚哉, 「格子QCD を用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究」, HPCI 第2 回成果報告会(日本科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
10. 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 宇川彰 for PACS Collaboration, 「N_f=2+1格子QCDによる軽原子核束縛エネルギーの計算」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
11. 賀数淳平, 「N_f=2+1格子QCDによる微小な運動量移行でのπ中間子形状因子の研究」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
12. 吉江友照, 「格子シミュレーションによるコンフォーマル理論の研究」, 筑波大学計算科学研究センター学際共同利用成果報告会(筑波大学、つくば、2015年10月20日).
13. 吉江友照, 「計算素粒子物理データ管理・共有基盤JLDG」, HPCIシステム利用研究課題成果報告会（科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
14. 吉江友照, 「HEPnet-J/sc報告」, 2015年度HEPnet-Jユーザー会（広島大学, 広島, 2015年11月24日-25日).
15. 根村英克 for HAL QCD Collaboration, 「ハイパー核の少数多体系計算に向けた格子QCDによるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会2015年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015年9月25日-28日).
16. 根村英克 for HAL QCD Collaboration, 「格子QCDによるハイペロンポテンシャルと軽い原子核への応用」, 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」の第４回研究会（湘南国際村センター, 2015年9月17日-18日).
17. 根村英克 for HAL QCD Collaboration, 「ハイパー核の少数多体系計算に向けたHAL QCD法によるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
18. 佐々木健志 for HAL QCD Collab., 「Coupled channel approach to two-baryon interactions from QCD」, ストレンジネス・ハドロン合同研究会（KEK東海キャンパス, 2015年8月3日－７日).

19. 佐々木健志 for HAL QCD Collab., 「物理点格子QCDによるバリオン間相互作用 - S=-2 セクター -」, 日本物理学会2015年秋季大会（大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2015年9月25日-28日).
20. 佐々木健志 for HAL QCD Collab., 「物理点格子QCDによるバリオン間相互作用[2] - S=-2 セクター -」, 日本物理学会第71回年次大会（東北学院大, 仙台, 2016年3月19日-22日).
21. 佐々木健志 for HAL QCD Collab., 「Dibaryon searches from lattice QCD」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム（ワンテラスコモンホール, 東京都千代田区神田, 2016年3月30日-31日).

(4) 著書、解説記事等

7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

1. 計算基礎科学連携拠点
   http://www.jicfus.jp/jp/
2. High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム
   http://www.jicfus.jp/field5/jp/
3. 理化学研究所計算科学研究機構(AICS)
   http://www.aics.riken.jp/
4. International Lattice Data Grid (ILDG)
   http://ildg.sasr.edu.au/Plone
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
   http://www.jldg.org/jldg/, http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 第 33 回格子上の場の理論国際会議組織委員会主催（組織委員長：藏増嘉伸）,
   The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015),
   2015 年 7 月 14 日-18 日, 神戸国際会議場, 神戸.
2. 筑波大学計算科学研究センター/理研 BNL 研究センター共催,
   RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016,
   2016 年 3 月 9 日-11 日, Brookhaven National Laboratory, New York, USA.
3. 筑波大学計算科学研究センター/計算基礎科学連携拠点(JICFuS)主催,
   研究会「有限温度密度系の物理と格子 QCD シミュレーション」,
   2015 年 9 月 5 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.

4. 筑波大学計算科学研究センター主催,
Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories,
2015 年 8 月 26 日-28 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.

9. 管理・運営

1. 藏増嘉伸、運営委員会委員、運営協議会委員
2. 吉江友照、共同研究運用委員会委員
3. 吉江友照、藏増嘉伸、計算機システム運用委員会委員

10. 社会貢献・国際貢献

11. その他