3 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	愼也(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、山﨑 剛(共同研究員)
助教	大野	浩史	
研究員	浮田	尚哉、吉村	友佑
学生	大学院	至生 6名、学	類生 5名

2. 概要

当部門では、数理物質系との密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を 推進している。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 (略称「OFP」: ピー ク演算性能 25PFLOPS の超並列クラスタ計算機、HPC(High Performance Computing)向けとし ては「京」を超える国内最高性能システム)が稼働を開始した。昨年度に引き続き、本年度も 筑波大学を中心とした PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、OFP を用いた大型 プロジェクト研究を推進した。これと並行して、有限温度・有限密度 QCD の研究、K→ππ 崩 壊におけるハドロン行列要素計算、テンソルネットワーク(TN)形式に基づく格子ゲージ理論・ スピンモデルの研究、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、「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・研究開発が始まっている。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。また、重点課題と並 行して、2016 年度から4つの萌芽的課題が設定され、1番目の課題である「基礎科学のフロ ンティアー 極限への挑戦」は基礎科学における分野横断的な研究課題であり、本グループも 分担機関として参加している。

3. 研究成果

【1】 PACS Collaboration による Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション

(藏增、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田)

2016 年秋に JCAHPC において Oakforest-PACS(OFP)が導入され、稼働を開始した。OFP は ピーク演算性能が 25PFlops であり、「京」コンピュータの 2 倍以上の理論演算性能を持つス ーパーコンピュータである。平成 29 年度に引き続き、平成 30 年度も PACS Collaboration に 基づく共同研究体制のもと、OFP を用いて物理点における 2+1 フレーバーQCD の大規模シミ ュレーションを推進した。

過去 30 年以上にわたり、格子 QCD は主にハドロン単体の諸性質解明を目指して来た。現 在の世界的な状況においては、2 つの大きな問題点が存在する。まず、物理点直上でのシミュ レーションが可能になったことは事実だが、実際には物理点のみで物理量の評価を行えるほ どの精度を得るレベルには至っていない。次に、現在の格子 QCD シミュレーションにおけ る物理量計算は"テーラーメイド"であると評されている。これは、目的とする物理量計算 に応じて、適当と思われる物理パラメータ(クォーク質量や空間体積など)を選んでシミュ レーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であ っても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現し ないということが起こりうる。OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物 理点直上で(10fm)³超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記 2 つの 課題を克服した計算を実現する。

平成 29 年度は、格子サイズ 128⁴と 64⁴ (現在世界の格子 QCD 計算で典型的に採用されて いる格子サイズ)の配位上で π 中間子質量と崩壊定数の計算を行い、両格子サイズ上での結 果に差異が見えることから、有限体積効果(系統誤差の一つ)の存在を確認した。平成 30 年 度は、計算手法の改良によって更なる高精度計算を実現し、有限サイズ効果の定量的解析に 成功した。図 1(左)は、格子サイズ 128⁴と 64⁴の配位上で計算された π 中間子の2 点相関関数 C_n(t)を用いて、それぞれについて時間 t における π 中間子の局所有効質量 m_n^{eff}(t)=ln(C_n(t)/C_n(t+1))をプロットしたものである。黒シンボルは 128⁴ 格子サイズの結果で、 青シンボルは 64⁴ 格子サイズの結果である。両者の有限サイズ効果による差異は 2.1(8)%であ る。また、図 1(右)は、格子サイズ 128⁴ と 64⁴ の配位上で計算された π 中間子崩壊定数を比較 したものである。64⁴ 格子サイズの結果(青シンボル)は 128⁴ 格子サイズの結果(黒シンボル)と 誤差 1 σ の範囲でかろうじて一致しているが、reweighting(再重み付け)法によって 128⁴ 格子 サイズと 64⁴ 格子サイズの π 中間子質量が等しくなるようにすると(図 1(左)の赤シンボル参 照)赤シンボルで表された結果となり、有限サイズ効果による差異は 0.66(33)%となる。これ らの結果は、研究論文 A-1 で発表済みである.



図 1: 格子サイズ 128⁴ と 64⁴ における π 中間子局所有効質量 (左) と π 中間子崩壊定数 (右)。

【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)

磁増、山崎は宇川名誉教授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、広島大学石川健一准教授を共同研究者に加え、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、試験的計算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。この計算はπ中間子 質量0.5GeVと0.3GeV 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0.14GeVに 相当)よりも重い質量を用いていた。この成果を踏まえ、京コンピュータで生成された96⁴格 子サイズのゲージ配位を用いた現実に近いπ中間子質量0.14GeVでの軽原子核束縛エネルギ ー計算を進めている。この計算は統計誤差を抑えることが非常に難しく、ヘリウム原子核に ついては有意な結果は得られていないが、重陽子については現状で実験値から予測された値 を再現する結果が見え始めている。今後は統計誤差を小さくするために、計算方法の改良も 含めて研究を継続していく。

また、これまでの束縛エネルギー計算に含まれる可能性のある励起状態からの系統誤差に ついて、重いクォーク質量を用いた超高精度計算による調査を行った。具体的には、異なる 二つの演算子、指数型演算子とウォール型演算子を用いた計算を比較した。励起状態の寄与 が抑えられていない小さな虚時間領域では、二つの演算子から得られた結果は異なる。ウォ ール型演算子では、励起状態が抑えられるまでに大きな虚時間領域を取る必要があるが、そ の領域で得られた束縛エネルギーは、指数型演算子から得られた結果と一致した。これまで の計算で用いている指数型演算子では、励起状態の寄与はウォール型演算子よりも小さな虚 時間で抑えられるため、これまでの計算では励起状態の系統誤差は十分小さいと考えられる。

さらに、ウォール型演算子から得られる有効エネルギー差の体積依存性を調べた。束縛状態、2核子散乱状態、核子-励起核子散乱状態を考慮し、各状態のエネルギーを別計算で得られ

筑波大学 計算科学研究センター 平成 30 年度 年次報告書

た値で固定した解析を行った。図2に、各体積の有効エネルギー差のフィット結果と2核子散 乱状態と核子-励起核子散乱状態の係数の体積依存性を示す。この結果から、ウォール型演算 子は体積が大きくなると散乱状態の寄与が体積に比例して大きくなることを示した。つまり、 ウォール型演算子は束縛エネルギー計算に適さないことを示唆した。



図2:(左)ウォール型演算子を用いた有効二核子エネルギー差。各体積の色に対応する破線は フィット関数ΔE_{NN}^{eff}=Σ_{{i=0,1,2}}R_iexp(-ΔE_it)を使ったフィット結果。i=0,1,2 は束縛状態、2核子散 乱状態、核子-励起核子散乱状態に対応する。実線は各体積での指数型演算子から得られた束 縛エネルギーの値。(右)散乱状態係数比の体積依存性。茶色と桃色破線はフィット結果。

【3】 格子 QCD を用いた核子構造研究(藏増、山﨑)

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値を再現できていなかった。

蔵増、山崎は、宇川名誉教授と、広島大学石川健一准教授、東北大学佐々木勝一准教授、理研計算科学研究センター新谷栄悟研究員、東北大学大学院生塚本夏基氏とともに、PACS Collaborationにおいて、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146MeV)を用いた核子形状因子計算を行ない、論文としてまとめた(研究論文A-4)。さらに、現実的クォーク質量直上で、一辺が10fmを超える体積のゲージ配位「PACS10」配位を用いた計算を行った(研究論文A-5)。その結果を図3にまとめる。図3は、電磁形状因子から得られた荷電 半径√(r_E²)v、磁気的半径√(r_B²)v、磁気能率µvについて、本計算結果(青塗丸)と実験値(緑線)、及び以前の結果(白抜き青丸)を比較したものである。本計算は研究論文A-6の結果(PACS'18)よりも高精度であり、実験と良く一致した結果が得られた。荷電半径の実験値の違いは陽子パズルとして知られており、今後さらなる高精度計算を行い、このパズルの解明に挑戦する計画である。



図3: 荷電半径√(r_E²)v(左)、磁気的半径√(r_B²)v(中央)、磁気能率µv(右)。青塗丸、白抜き 青丸、緑線は、PACS10配位結果(研究論文A-5)、以前の結果、実験値を表す。PACS'18は研 究論文A-4の結果。

【4】 現実的クォーク質量を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算

(藏增、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田)

大学院生賀数と山崎は現実のπ中間子質量及びK中間子質量でのセミレプトニック崩壊の 動的 2+1 フレーバー大規模格子 QCD シミュレーションを行うことで、CKM 行列要素の一つ である Vus (の絶対値)の決定を行った。この物理量はクォークの世代間混合を表す行列であ る CKM 行列の行列要素のうち、アップクォークとストレンジクォークの混合の度合いを表 す量である。この行列は標準理論においてユニタリー性を持つと考えられ、ユニタリー性の 確認を行うことで標準理論を超える物理の検証を行うことができる。Vus の測定は K 中間子 のセミレプトニック崩壊の崩壊率を測り、そこから|Vus|とセミレプトニック形状因子と呼ば れるハドロニックな補正を表す量との積が得られる。この形状因子を制限することで|Vus|が 得られる。

本研究では K 中間子セミレプトニック崩壊を表すハドロン行列要素を計算、そこからセミ レプトニック形状因子の構成を行った。また、実験でよく使われている monopole ansatz や QCD の低エネルギー有効理論であるアップ、ダウン、ストレンジクォークのカイラル対称性 の破れが関わる SU(3)カイラル摂動論から得られた形状因子の表式等を使って、CKM 行列要 素の評価に必要な運動量移行がゼロでの形状因子の結果を評価、これと実験結果を組み合わ せて、|Vus|の評価を行い、標準理論の予測と無矛盾な結果を得た。図4には、本研究結果(赤 四角と赤丸)と標準模型の予測(茶色帯)、及びこれまでの研究結果を示す。今後は詳細な系統 誤差の見積もり、具体的には、励起状態の寄与や離散化誤差の評価等を行う予定である。



図 4: |Vus|の他の研究結果(形状因子の計算結果、崩壊定数の比の計算結果から)との比較。茶 色の帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

【5】 場の理論的相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数(藏増、山崎)

場の理論で定義される二体粒子Bethe-Salpeter波動関数からは、多くの格子QCD散乱位相差 計算で使われてきた有限体積法が導出できるだけでなく、実験で観測される質量殻上散乱振 幅を一般化した半質量殻外散乱振幅を求める公式も導出できる。藏増、山﨑は、昨年度導出 したBethe-Salpeter波動関数と散乱振幅の関係式を元に議論を発展させ(研究論文A-6)、現在、 他グループで用いられている計算方法から正しい結果を得るために必要な条件を議論した。

【6】 格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱振幅 (藏増、山崎)

散乱長は、粒子間の相互作用を特徴づける基本的な物理量である。これまで、相互作用範 囲外のBethe-Salpeter波動関数から導出された有限体積法により種々の散乱長が計算されてき た。滑川、山崎は2π中間子系において、相互作用範囲内のBethe-Salpeter波動関数を用いて散乱 振幅を決定した(研究論文A-7)。得られた散乱振幅から散乱長を計算し、既存の手法で求め られた結果との一致が確認できた。加えて、半オフシェル散乱振幅計算に世界で初めて成功 した。平成30年度は、さらに散乱振幅のπ中間子質量依存性を調べ、論文としてまとめた(研 究論文B-4)。この論文では、演算子依存性や虚時間依存性などの散乱振幅の性質についても 議論を行った。

【7】 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、かつ標準模型の検証において極めて重要な問題が残されている。K 中間子崩壊での $\Delta I=1/2$ 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} =250MeV の元で、終状態の π 中間子状態が運動量をもった物理的な崩壊過程につい て計算した(研究論文 A-8)。この計算により、 $\Delta I=1/2$ 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、実験値を再現する結果が得られた: Re(ϵ'/ϵ)=(1.94±5.72)×10⁻³, (実験値:(1.66±0.23)×10⁻³)。標準模型から実験値を再現できたことは一定の成果ではあるが、 より詳細な標準模型の検証のためには、CP 非保存パラメータの有限値を求める必要がある。 そのためには現在の計算誤差を 1/5 以下にする必要がある。現在、K 中間子、 π 中間子の演算 子を改良し統計誤差を小さくすることを考え、その試験計算を行っている。

【8】 Gradient flow による K 中間子 B パラメータの研究(谷口)

K中間子のK0-K0bar混合は、間接的なCPの破れを与える重要な物理現象である。K0-K0bar 混合の実験結果から弱い相互作用のCKM 行列要素を引き出すためには、強い相互作用によ る補正項であるBパラメータB_Kを量子色力学に基づき評価しておく必要がある。非摂動論的 問題なので、計算機を用いた格子による評価が重要で、多くの先行研究がある。ダブラー問 題を避けてWilsonフェルミオンによりBパラメータを評価しようとすると、従来の計算では、 カイラル対称性の陽な破れのために、本来カイラル対称性から禁じられている寄与が混入し てしまい、これを差し引きするために大きな誤差がもたらされていた。

この問題に対する解決策として、我々はグラジエントフローを用いる方法を有力視している。上記有限温度の場合と同様に、ゼロ温度でも、カイラル対称性の関係した物理量の正しくくりこまれた値を評価する上で、グラジエントフロー法が有力であると期待している。グラジエントフローによるカイラル対称性の回復を確認するために、谷口、鈴木、馬場は、グラジエントフロー法を用いてPCAC関係式の検証を行った。図5の左図で、赤と青のデータはそれぞれPCAC関係式の左辺と右辺の評価結果を表している。期待どおり、両者がよく一致していることがわかる(国内学会発表B-19)。これを受け、谷口と鈴木はBパラメータの数値計算に着手した。図5の右図で、今回測定されたBパラメータのフロー時間依存性を示す。黒が各フロー時間tで得られたB_Kの結果を表し、青が、小さなtでの格子誤差を避けながらt→0に外挿した結果である。ここからB_K=0.607(24)を得た。ただし、現在計算に使用しているクォークは物理的な値と比して非常に重い(m_{π} ~630MeV)。このために、今回の結果はFLAG等の結果よりも大きな値となっていると考えられる(国内学会発表B-20)



図5: グラジエントフロー法によるK中間子Bパラメータの研究。(左)PCAC関係式の計算。 横軸は空間距離(学会発表19)。(右)K中間子BパラメータB_Kの計算。横軸はフロー時間t(国 内学会発表B-20)。

【9】 格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究(金谷、谷口)

金谷、谷口らは、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教、新潟大学江尻信司准教授、 広島大学梅田貴士准教授らとの共同研究で、有限温度・有限密度QCD相構造とクォーク物質 の熱力学的諸性質を、改良ウィルソン型格子クォークを用いた格子QCDシミュレーションに より研究した。格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、エネルギー運動量テ ンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起因して、格子QCDに よるエネルギー運動量テンソルの評価には、5種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非 摂動論的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究では、 この非摂動論的なくりこみの問題に関して、グラジエントフロー(勾配流)を用いて根本的 な解決を図る。Lüscherらにより提案されたグラジエントフローは格子上の物理量計算に様々 な革新をもたらしているが、特に、共同研究者である鈴木らにより、これまで格子での計算 や定義に大きな困難が伴っていた様々な物理量の非摂動論的評価に新しい方法が提案された。 この方法は、ウィルソン型クォーク作用で大きな困難となっていたカイラル凝集や位相感受 率などの評価にも有効である。我々は鈴木らの方法を動的クォークを含むfull QCDシミュレ ーションに適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究している。2016-2017 年度に実行した クォークが重い場合のNf=2+1 QCDで最初の研究により、エネルギー運動量テンソルの対角成 分が従来の方法による状態方程式を再現することを示し、カイラル感受率がクロスオーバー 温度でピークを示すことをウィルソン型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を 評価し、アクシオン質量がインスタントン模型の予想と一致する温度依存性を持つことを示 した。2018年度は、この研究を発展させ、現実のクォーク質量での研究と格子間隔を変えた シミュレーションを推進した。並行して、エネルギー運動量テンソルの相関関数やグラジエ ントフロー法のマッチング係数における高次項の効果の研究などを行った。

Gradient flowを用いた有限温度(2+1)-flavor QCDの研究

(i) 物理点でのシミュレーション

グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的 ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。また、 グラジエントフローのクーリング効果によって、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る。クォ ークが重い場合にグラジエントフロー法の高い有用性が示されたことをうけ、計算コストの 高い物理点での研究をグラジエントフロー法で推進することとし、改良ウィルソン型クォー ク作用と岩崎ゲージ作用を用いて、クォーク質量を現実の値に合わせた研究を開始した。 PACS-CS Collaborationが生成した32³×64格子、格子間隔a≈0.09fmのゼロ温度物理点配位を利用 し、固定格子間隔法でT≈122-544MeV (Nt=18-4)の温度をシミュレーションしている。クォーク が重い場合のa≈0.07fmより格子がやや粗いので、温度T=1/(aNt)をより細かく変える為に、奇 数のNt も数点採用している。クォークが重い場合は190MeV周辺が臨界温度であったが、ク ォークが軽いのでより低温側にシフトすると予想される。しかし、この格子作用の場合の臨 界温度はわかっていない。

格子場の理論国際会議LATTICE2017で行った中間発表(研究論文B-8)で、エネルギー運動 量テンソルの一点関数やカイラル凝集について、クォークが重い場合とほぼ同様に有意な計 算が可能であることが確認された。他方、クォーク質量が小さい効果に加え、格子間隔がや や粗いことが影響して、クォークが重い場合より格子化誤差が大きい傾向があり、より高い 統計と精密な系統誤差評価が必要である。この発表の段階である程度完了していたT > 157MeV (Nt≤14)でのシミュレーションから、相転移温度がかなり低そうである(Tpc<169MeV) ことが示唆されたが、相転移点の特定には至らなかった。

その後、より低温側のT≈122MeV,137MeV(Nt=18,16)を含むシミュレーションを系統的に 進めた。図6に、2018年度末の学会発表の段階での状態方程式の結果を示す。クォークが重い 場合と違って、同じ配位を用いた通常の方法による状態方程式の結果はまだ無いが、クォー クが重い場合の経験から、T>247MeV(Nt≤8)では格子化誤差が小さくないと予想される。



図6: グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCDの状態方程式。現実のクォーク質量の結果(preliminary)。(左)エントロピー密度 ϵ +pと(右)トレース・アノマリ ϵ -3p(国内学会発表B-16)。横軸は温度T。

物理点でのカイラル凝集の現状の結果を図7に示す。左図はu,dクォークのカイラル凝集、 右図はsクォークのカイラル凝集である。クォークが重い場合には、u,dクォーク質量がsク ォーク質量と同程度だったために、両者のカイラル凝集が同様の振る舞いを示していたが、 u,dクォークの質量が下がると、軽いクォークのカイラル凝集の温度依存性が大きく変わるこ とがわかる。sクォークのカイラル凝集から、T~130-150MeVを臨界温度と考えると、そこで 軽いクォークのカイラル凝集はかなり急激に変化すると思われる。これまでシミュレーショ ンした範囲では低温側のデータが無いので明確な結論は難しいが、クォークが軽くなればな るほどカイラル相転移が際立つだろうという理論的期待と矛盾しない。

低温格子(Nt=18,16 など)の統計はまだ十分ではないが、これらの結果から相転移点近傍 であることが想像される。それをより明確に見るために、カイラル感受率の非連結部分を図 8 に示す。この u,d クォークの結果からは、122<Tpc<146MeV に臨界温度があると示唆され る。この低い臨界温度は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 T~150MeV と 矛盾しない。現在、この臨界温度近傍で、統計を上げるための配位生成や、奇数 Nt シミュレ ーションを進めている。



図7: グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCDのカイラル凝集。真空期待値が差し引かれている。現実のクォーク質量の結果(preliminary)。(左) u,dクォークと(右) sクォー



ク(国内学会発表B-16)。

図8: グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCDのカイラル感受率の非連結部分。 現実のクォーク質量の結果(preliminary)。(左) u,dクォークと(右) sクォーク(国内学会発表 B-16)。

<u>Gradient flowを用いた有限温度(2+1)-flavor QCDの研究</u>

(ii) 格子間隔依存性

2016-2017 年度に実行したクォークが重い場合の(2+1)-flavor QCD で最初の研究では、エネ ルギー運動量テンソルやカイラル感受率、位相感受率などで、物理的期待と一致する様々な 結果が得られた。これらの結果は、a≈0.07fmの格子間隔1点で得られたものである。様々な 物理量で、全く異なる評価方法の結果が良く一致していることにより、この格子が連続極限 に近いことが強く示唆されるが、格子間隔依存性が小さいことは直接確認しておく必要があ る。そのために、このクォークが重い場合で格子間隔を変えた研究も進めている。統計がま だ十分ではないが、状態方程式について格子間隔依存性が大きくないことを示唆する中間結 果を得た(国内学会発表 B-9)。

Gradient flow を用いたエネルギー運動量テンソル相関関数と輸送係数の研究

グラジエントフロー法でエネルギー運動量テンソルそのものが計算できるようになったこ とにより、その非対角要素や二点相関関数も直接評価可能となった。そこから、輸送係数な ど、クォーク物質の様々な熱力学特性を引き出す試みを進めている。最初の試みとして、ク ォークが重い場合を研究した。図9の左図に、様々な方法で計算したエントロピー密度の結 果を示す。赤三角と青三角はエントロピー密度をエネルギー運動量テンソルの異なる成分の 二点関数から線形応答関係式を用いて評価した結果で、黒丸はエネルギー運動量テンソルの ー点関数から求めた我々の2017年の結果である。誤差はまだ大きいが、フロー時間がゼロの 極限 t→0 で、格子間隔依存性が取り除かれ、三つの結果が期待どおり一致することが見て取 れる(研究論文 B-8)。図9の右図では、エネルギー運動量テンソルの二点関数から評価した 剪断粘性係数(shear viscosity η)の中間結果を示す。剪断粘性率の計算にはスペクトル関数の低

筑波大学 計算科学研究センター 平成 30 年度 年次報告書

エネルギー極限を評価する必要がある。ここでは、エネルギー運動量テンソルの二点関数を スペクトル関数に関する2種類のモデル関数(Breit-Wigner 型および hard thermal loop 型)で フィットし、その低エネルギー極限をとった。図9の右図でこれら2種類の評価結果を黒丸 と赤三角で示す。重イオン衝突実験の示唆する $\eta/s~0.12$ や AdS/CFT 対応理論の予言である $\eta/s=1/(4\pi)$ に近い結果を得た。ただし、二点関数では格子化誤差が一点関数より大きくなる傾 向があり、系統誤差の精密な評価に向けて更なる研究が必要である(研究論文 B-11)。



図9: グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCDにおけるエネルギー運動量テン ソルの二点相関関数の研究。クォークが重い場合の結果(preliminary)。(左)様々な方法で計 算したエントロピー密度。横軸はフロー時間t(研究論文B-9)。(右)剪断粘性係数 η とエン トロピー密度sの比。青線はADS/CFT対応から予言される1/(4 π)(研究論文B-11)。

<u>その他</u>

相転移点の特定において、カイラル感受率の非連結部分が大きな役割を果たした。カイラ ル感受率の連結部分については、計算にクォーク二体演算子の相関関数の評価が要求される。 スタガード型クォークなどを使った先行研究では、カイラル感受率の連結部分は相転移に敏 感では無さそうであることが報告されている。グラジエントフローを使ってクォークが重い 場合の連結部分を評価した結果、ウィルソン型クォークでも同様の振る舞いが示唆されるこ とを見た(研究論文B-10)。

フルQCDの研究と並行して、SU(3)ゲージ理論における一次相転移の研究も継続している。 これは、有限密度QCD やクエンチ近似QCD 近傍のクォークが非常に重い場合に期待されて いる一次相転移やその端点(臨界点)の検出に向けての計算技法開発の一環でもある。グラ ジェントフロー法を用いてSU(3)ゲージ理論の潜熱評価を見直し、従来の方法との比較や、格 子間隔効果、有限体積効果の検証を行った(研究論文B-12)。 【10】 4 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点(藏増、大野)

有限温度 QCD における相転移の次数は、クォークのフレーバー数及び質量に依存して多様 に変化すると予想されている。特に、3フレーバーQCD の場合、クォーク質量 0 の極限では 1 次相転移となり、クォーク質量を大きくしていくと、2 次相転移点である臨界終点を経て、 クロスオーバーになると期待されている。しかしながら、これまでの格子 QCD 研究の結果 は、連続極限に近づく程、臨界終点でのクォーク質量が小さくなり、その近づき方も、フェ ルミオン作用の違いで大きく異なることを示しており、未だに臨界終点の位置について、確 定的な結果は得られていない。

大野は、筑波大の藏増嘉伸教授、金沢大の武田真滋准教授、理研の中村宜文氏らとともに、 ウィルソン型フェルミオン作用を用いて、有限温度4フレーバーQCDの臨界終点を調べた(研 究論文B-13)。ここで、4フレーバーQCDは、3フレーバーQCDと同様に、クォーク質量0の極 限で1次相転移があり、スタッガード型フェルミオン作用でしばしば疑問視されているrooting の必要もないため、スタッガード型とウィルソン型フェルミオン作用の結果をより理想的な 条件で比較できる。よって、3フレーバーQCDの結果を検証する上でよい比較対象となる。本 研究では時間方向の格子サイズを4、6、8として計算を行い、それらの結果を用いて臨界終点 の連続極限をとった。得られた結果を、先行研究の3フレーバー、ウィルソン型フェルミオン 作用での結果と比較すると、4フレーバーの場合の方が、臨界終点におけるπ中間子質量が大 きいことが分かった。また、同様に、スタッガード型フェルミオン作用の結果と比較すると、 3、4フレーバー共に、ウィルソン型フェルミオン作用の方が大きいπ中間子質量を持つことが 分かった(図10)。



図10: 臨界終点におけるπ中間子質量の格子間隔依存性。3、4フレーバーウィルソン型フェル ミオン作用の結果をそれぞれ青、赤色の点で示す。同様に、スタッガード型フェルミオン作 用の結果をそれぞれ橙、紫色の点で示す。

【11】 クォーコニウムスペクトル関数の研究(大野)

有限温度におけるクォーコニウムのスペクトル関数は、クォーコニウムの高温媒質中での 振る舞いや、重クォーク輸送に関する情報を含んでおり、重イオン衝突実験で実現している と考えられるクォーク・グルーオン・プラズマの性質を、理論的に理解する上で非常に有用 である。しかしながら、格子 QCD による第一原理計算において直接得られる量は相関関数で あり、これはスペクトル関数を積分したものと関係している。従って、スペクトル関数は、 相関関数に対する逆問題を解くことによって得ることができる。ところが、これは典型的な ill-posed 問題として知られており、解くことは一般的に非常に困難である。大野は、主に、華 中師範大の Heng-Tong Ding 教授、Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏、Brookhaven 国立研究所 の Swagato Mukherjee 氏らと共に、Stochastic 法を用いてクォーコニウムのスペクトル関数を 計算した(研究論文 A-9)。得られた結果を、従来よく用いられている最大エントロピー法の 結果と比較したところ、互いに無矛盾な結果が得られることが分かった。また、スペクトル 関数の形状をみることで、クォーコニウムの消失温度や重クォーク拡散係数を調べた(研究 論文 A-10)。

【12】 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、吉村)

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 然界のの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、格子SUSY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。な お、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における4つの 萌芽的課題のうち、1番目の課題である「基礎科学のフロンティアー極限への挑戦」に含まれ ており、本グループも分担機関として参加し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への 応用に取り組んでいる。

2014年、藏増と理研計算科学研究機構(現理研計算科学研究センター)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、0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。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。また、並行して、素粒子物理にとって興味深い低次元モデルの解析も行う。

平成 30 年度における課題(i)~(iv)の主要な研究成果は、以下のとおりである。課題(i): 3 次 元 Z2ゲージ理論を TN 法によって数値計算するためのアルゴリズム開発を行った。具体的に は、Higher Order Tensor Renormalization Group(HOTRG)法をベースとしたアルゴリズム改良を 行い、3次元Z₂ゲージ理論における有限温度相転移の高精度解析に成功した。図11(左)は、 比熱の体積依存性をプロットしたものである。体積が増大するにつれて、期待通り鋭いピー クが形成されている。これらの解析結果を論文にまとめ、現在学術雑誌に投稿中である(研 究論文 B-15)。課題(ii)、(iii):一般的に、TN 法はモデルの次元が上がるにつれて計算コスト が増大する。そのため、これまで TN 法の主な応用例は2次元モデルに限られており、4次元 モデルへの適用例は存在しない。われわれは、4次元における最も簡単なモデルであるイジン グモデルに対して HOTRG 法を応用し、相転移現象の解析を試みた。その際、不純物テンソ ル法と呼ばれるグリーン関数計算手法を用いて内部エネルギーを計算し、その温度・体積依 存性を詳細に調べることによって相転移の次数決定を可能とした。今後論文の取り纏めの作 業に入る予定である。課題(iv):素粒子標準理論およびそれを超える理論の重要な構成要素と してスカラー理論における自発的対称性の破れがある。その低次元モデルとして2次元 φ⁴理 論に着目し、TN 法による自発的対称性の破れの解析に取り組んだ。具体的には、自発的対称 性の破れが起きる臨界結合定数の高精度計算を行った。図11(右)は臨界結合定数の連続極 限への外挿の様子を表している。他グループによる異なる手法で得られた結果と比較すると、 連続極限において概ね誤差の範囲で矛盾しない結果が得られている(研究論文 A-12)。



図11:(左)3次元Z₂ゲージ理論における比熱の体積依存性。(右)2次元φ⁴理論における臨界 結合定数の連続極限への外挿。

【13】 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の一つである。 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可能性がある。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。山崎は名古屋大学山脇幸一名誉教授や KEK 青木保道特任准教授らと共に、LatKMI Collaboration において、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ている。

これまでの4、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ことを示唆した。今年度は、これまでよりも大きな体積、軽いフェルミオン質量の結果を加え、崩壊定数などの物理量のカイラル外挿解析を更新した。また、4、8、12 フレーバー理論のフレーバー1 重項擬スカラー中間子質量の比較や8 フレーバー理論の S パラメータ計算を行った。

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

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。2008 年に実運用を開始して以来 10 年経過 した現在、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使用している。JLDG は実 用システムとして、数年前から一定の完成の域に達しており、今年度もシステムの増強・安 定運用を主眼に活動を行った。システムメンテナンス等の日常業務以外の活動は、以下の通 りである。

- ① 東大拠点整備(Intel AMT を利用した遠隔監視・起動・停止システム構築)
- ② 筑波大 IPMI 管理ネットワークの整備
- ③ 公開 QCD 配位の DOI 登録(『DOI 登録ポリシー』『公開データ管理ポリシー』の策定、 JICFuS 内に DOI 運用部会を立ち上げ)
- ④ 利用統計集計システムの整備
- ⑤ 新拠点設置準備
- ⑥ セキュリティ向上(脆弱性対策、ILDG 基本サービスの一部中止と代替手段の提供)

4. 教育

【1】 学位論文

[博士論文]

1. 賀数 淳平

[Calculation of Vus from lattice QCD]

2. 鈴木 遊

Study of Kaon Bag Parameter with Wilson Fermion using Gradient Flow

[修士論文]

1. 秋山 進一郎

「高次テンソル繰り込み群による4次元 Ising 模型の比熱の解析」

【2】 集中講義

1. 藏増嘉伸、神戸大学システム情報学研究科客員教授(2018年4月~2018年9月) 「計算科学特論」(集中講義)を担当。

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

外部資金

- 青木愼也(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』、208,763千円
- 2. 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」、800千円
- 藏増嘉伸(分担)、一般受託研究、平成28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』萌芽的課題
 1:基礎科学のフロンティア - 極限への挑戦(基礎科学の挑戦-複合・マルチスケ ール問題を通した極限の探求)』、16,400千円
- 4. 谷口裕介(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成30年度採択、「勾配流法 を用いたクォーク・グルーオン・プラズマの物性的研究」、910千円
- 5. 山崎剛(代表)、科学研究費補助金・若手研究(A)、平成28年度採択、「量子色力学 を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究」、7,200千円
- 7日尚哉(代表)、科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究、平成28年度採択、「格子数 値計算による超対称性の自発的破れの解明」、700千円

知的財産権

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

- PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié, "Finite size effect on pseudoscalar meson sector in 2+1 flavor QCD at the physical point", Phys.Rev. D99 (2019) no.1, ref.014504.
- PACS Collaboration: Naoya Ukita, Ken-Ichi Ishikawa, and Yoshinobu Kuramashi, "Utility of geometry in lattice QCD simulations", Phys.Rev. D98 (2018) no.1, ref.014515.
- PACS Collaboration: Taku Izubuchi, Yoshinobu Kuramashi, Christoph Lehner, and Eigo Shintani, "Finite-volume correction on the hadronic vacuum polarization contribution to the muon g-2 in lattice QCD", Phys.Rev. D98 (2018) no.5, ref.054505.
- 4. PACS Collaboration: Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Natsuki Tsukamoto, Akira Ukawa, and Takeshi Yamazaki, "Nucleon form factors on a large volume lattice near the physical point in 2+1 flavor QCD", Phys. Rev. D 98, no. 7 (2018) ref.074510.
- PACS Collaboration: Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, and Takeshi Yamazaki, "Nucleon form factors and root-meansquare radii on a (10.8 fm)⁴ lattice at the physical point", Phys. Rev. D 99, no. 1 (2019) ref.014510.
- Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, "Reply to "Comment on' Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory "", Phys. Rev. D 98, no. 3 (2018) ref.038502.
- 7. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, "Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range, Phys. Rev. D 98, no. 1 (2018) ref. 011501.
- 8. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, "Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with an improved Wilson fermion action in a nonzero momentum frame in lattice QCD", Phys. Rev. D92 (2015) ref.074503
- 9. H. T. Ding, O. Kaczmarek, S. Mukherjee, H. Ohno and H. T. Shu Stochastic, "Reconstructions of spectral functions: Application to lattice QCD", Phys. Rev. D 97, no. 9 (2018) ref.094503.
- H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A.-L. Kruse, R. Larsen, L. Mazur, Swagato Mukherjee, H. Ohno, H. Sandmeyer and H.-T. Shu, "Charmonium and bottomonium spectral functions in the vector channel", Nucl. Phys. A 982 (2019) ref.715.
- 11. Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, and Ryoichiro Ueno, "Irregular parameter dependence of numerical results in tensor renormalization group analysis", PTEP in press.

 Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, "Tensor network analysis of critical coupling in two dimensional φ⁴ theory", JHEP 1905 (2019) ref.184.

B) 査読無し論文

- PACS Collaboration: Eigo Shintani and Yoshinobu Kuramashi, "Study of systematic uncertainties in hadronic vacuum polarization contribution to muon g-2 with 2+1 flavor lattice QCD", arXiv:1902.00885 [hep-lat].
- PACS Collaboration: Eigo Shintani and Yoshinobu Kuramashi, "Analysis of systematic error in hadronic vacuum polarization contribution to muon g-2", PoS (LATTICE2018) (2019) ref.060.
- Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, "Quark mass dependence of on-shell and half offshell scattering amplitudes from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range", arXiv:1904.00387 [hep-lat].
- 4. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, "Scattering length from BS wave function inside the interaction range", PoS (LATTICE2018) (2019) ref.078.
- Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, "Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory", PoS (LATTICE2018) (2019) ref.077.
- 6. Takeshi Yamazaki, "Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range", Springer Conference Proceedings (2019) pp.1-7, in press.
- PACS Collaboration: J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, "Calculation of K→πlv form factor in Nf=2+1 QCD at physical point on (10 fm)³", PoS (LATTICE2018) (2019) ref.265.
- Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takash Umeda [WHOT-QCD Collaboration], "Equation of state in (2+1)flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow", EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07023.
- Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, "Energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD at finite temperature", EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07013.
- Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori, Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda, "Measuring of chiral susceptibility using gradient flow", PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.173.

- Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, "Study of energymomentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD for QGP viscosities", PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.166.
- Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, "Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow", PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.164.
- H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda, "Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions", PoS (LATTICE 2018) (2019) ref.174.
- Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, "Tensor network study of two dimensional lattice φ⁴ theory", PoS (LATTICE2018) (2019) ref.232.
- 15. Yoshinobu Kuramashi and Yusuke Yoshimura, "Three-dimensional finite temperature Z₂ gauge theory with tensor network scheme", arXiv:1808.08025 [hep-lat].

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

- Yoshinobu Kuramashi 「Application of tensor network scheme to particle physics」, International Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA 2018-2019), (R-CCS, Kobe, Japan, Dec. 3-6, 2018).
- Takeshi Yamazaki 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range」, XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB22) (Caen Convention Center, France, June 9-13, 2018).
- Takeshi Yamazaki [[]PACS10 project in lattice QCD], 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (University of Tsukuba, Tsukuba, October 15-16, 2018).

B) 一般講演

 Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi Thermodynamics near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory J, YITP
 long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018).

- Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda 「Thermodynamic quantity near first phase transition point using Gradient flow method」, YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018).
- 3. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki 「Scattering length from BS wave function inside the interaction range」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- 5. Yoshinobu Kuramashi, Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Shoichi Sasaki, Natsuki Tsukamoto and Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Nucleon form factors on a (10.8 fm)⁴ lattice at the physical point in 2+1 flavor QCD」, The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration 「Calculation of K→πlv form factor in Nf=2+1 QCD at physical point on (10 fm)³」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- 7. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda 「Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow 」, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Asobu Suzuki, Atsushi Baba 「Study of energy-momentum tensor correlation function in Nf=2+1 full QCD for QGP viscosities」, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- 9. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Yusuke Taniguchi, Asobu Suzuki [「]Measuring of chiral susceptibility

using gradient flow j, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).

- H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda 「Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4 flavor QCD with Wilson Clover fermions」, The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- Yusuke Yoshimura and Yoshinobu Kuramashi \[\[72] Z_2 gauge theory with tensor renormalization group\], The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- 12. Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Sinji Takeda, and Yusuke Yoshimura \lceil Tensor network study of two dimensional lattice φ^4 theory \rfloor , The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018).
- Kazuyuki Kanaya 「Theromodynamic quantities in (2+1)-flavor QCD using gradient flow」, CCS international symposium 2018: 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Univ. Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 10.15-16, 2018).
- H. Ohno 「The nature of the finite temperature phase transition of 4 flavor QCD」, Edinburgh-Tsukuba Collaboration Meeting (Bayes Center, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, December 3-4, 2018).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

 山崎剛「Lattice QCD studies on nucleon form factors」, KEK 研究会「QCD と核子構造の 進展 2019」(KEK, つくば, 2019 年 2 月 28 日-3 月 1 日).

B) その他の発表

- 1. 鈴木博, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北澤正清, 下条昂礼, 谷口裕介, 梅田貴士「グ ラディエント・フローによる量子色力学の状態方程式」, 学際大規模情報基盤共同利 用・共同研究拠点(JHPCN) 第10 回シンポジウム(THE GRAND HALL, 東京都, 品 川区, 7/12-13, 2018).
- 2. 谷口裕介,馬場惇,江尻信司,金谷和至,北沢正清,下条昂礼,鈴木遊,鈴木博,梅田 貴士「QGP 粘性係数導出に向けた Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソル相関関数

の研究」,熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018).

- 3. 金谷和至, 江尻信司, 石見涼, 北澤正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木博, 谷口裕介, 梅 田貴士「グラジエントフローによる 2+1 フレーバーQCD の状態方程式--格子間隔依 存性の検証」, 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼 玉県, 和光市, 8.28-30, 2018).
- 4. 板垣翔太,石見涼,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,白銀瑞樹「再重み付け 法による SU(3)ゲージ理論の重いクォーク領域における一次相転移終点でのハドロ ン質量の計算」,熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES,埼 玉県,和光市, 8.28-30, 2018).
- 馬場惇,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北澤正清,下条昂礼,鈴木博,谷口裕介,鈴 木遊「Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018)(理化学研究所 iTHES,埼玉県,和光市,8.28-30,2018).
- 7. 滑川裕介,山崎剛「格子 QCD による半質量殻外散乱振幅のクォーク質量依存性評価」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).
- 7. 賀数淳平,石川健一,石塚成人,藏増嘉伸,中村宜文,滑川裕介,谷口裕介,浮田尚哉, 山崎剛,吉江友照 for PACS Collaboration「物理点での大規模格子 QCD による軽中間 子形状因子計算」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).
- 谷口裕介,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,下条昂礼,鈴木遊,鈴木博,馬場惇「QGP 粘性係数導出に向けた Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).
- 鈴木博,石見涼,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,下条昂礼,白銀瑞樹, 鈴木遊,谷口裕介,馬場惇「Thermodynamic quantities in the Nf=2+1 QCD; the case of somewhat heavy ud quarks」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9月 14-17 日).
- 馬場惇,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,下条昂礼,鈴木博,谷口裕介 「Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信 州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).
- 11. 板垣翔太,石見凉,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,白銀瑞樹「重いクォーク領域における格子 QCD の臨界質量の決定に関するホッピングパラメータ展開の収束性」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).

- 12. 清原淳史, 板垣翔太, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 谷口裕介, 白銀瑞樹「ポリヤコ フループを含む作用に基づくモンテカルロ計算による重クォーク QCD の相転移の 解析」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日).
- 13. 鈴木遊,谷口祐介「Gradient flow を用いた ΔS=1 の 4-fermion 演算子の繰り込み因子の計算」,日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学,松本,2018 年 9 月 14-17 日).
- 14. 吉村友佑, 藏増嘉伸「テンソルくりこみ群による3次元有限温度Z2ゲージ理論」,日本物理学会2018年秋季大会(信州大学, 松本, 2018年9月14-17日).
- 15. 江尻信司,金谷和至,梅田貴士,谷口裕介,北澤正清,鈴木博,若林直輝,下条昂礼, 鈴木遊,馬場惇,板垣翔太,白銀瑞樹「ウイルソン型フェルミオンを用いた 2+1 フレ ーバーQCD の熱力学量」,第5回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会(THE GRAND HALL,東京都,品川区,11/2,2018).
- 16. 金谷和至,石見涼,梅田貴士,江尻信司,北沢正清,下条昂礼,白銀瑞樹,鈴木遊,鈴 木博,谷口裕介,馬場惇「グラジエントフローによる格子 2+1 フレーバーQCD の熱 力学研究」,日本物理学会第74回年次大会(九州大学,福岡,2019年3月14-17日).
- 17. 谷口裕介,梅田貴士,江尻信司,金谷和至,北沢正清,下条昂礼,鈴木遊,鈴木博,馬 場惇「QGP 粘性係数導出に向けた Nf=2+1 QCD エネルギー運動量テンソル相関関数 の研究(II)」,日本物理学会第74回年次大会 (九州大学,福岡,2019年3月14-17日).
- 清原淳史,板垣翔太,江尻信司,金谷和至,北沢正清,白銀瑞樹,谷口裕介「改良した クエンチ QCD による重クォーク QCD の臨界点の精密解析」,日本物理学会第74回 年次大会(九州大学,福岡,2019年3月14-17日).
- 19. 馬場惇, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木遊, 鈴木博, 谷口裕介「Wilson fermion の下での gradient flow を用いた PCAC 関係 式の検証」, 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日).
- 20. 鈴木遊, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白銀瑞樹, 鈴木博, 谷口裕介, 馬場惇「Gradient flow を用いた K 中間子の Bag パラメータの数値的 研究」, 日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日).
- 秋山進一郎,藏増嘉伸,吉村友佑,山下巧「高次テンソル繰り込み群を用いた4次元 Ising 模型の比熱の解析」,日本物理学会第74回年次大会(九州大学,福岡,2019年3 月14-17日).
- 22. 坂井涼,加堂大輔,藏増嘉伸,中村宜文,武田真滋,吉村友佑「テンソルくりこみ群による2次元φ⁴理論の臨界結合定数の計算」,日本物理学会第74回年次大会(九州大学,福岡,2019年3月14-17日).

(4) 著書、解説記事等

1. 藏増嘉伸,"経路積分における数値的方法 - 確率的手法と決定論的手法--",「数理科学」 (サイエンス社) 2019 年 2 月号 No.668, 44-51.

7. 異分野間連携·国際連携·国際活動等

- 計算基礎科学連携拠点 http://www.jicfus.jp/jp/
- 2. 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS) https://www.r-ccs.riken.jp/jp/
- International Lattice Data Grid (ILDG) http://ildg.sasr.edu.au/Plone
- 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

9. 管理・運営

- 1. 藏增嘉伸、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

海外長期滞在、フィールドワークなど