

## I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照

助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、毛利 健司

計算科学研究センター客員研究員 青木 慎也（京大基研）

研究員 浮田 尚哉、賀数 淳平、新谷 栄悟、吉村 友佑

大学院生（13名）

### 【人事異動】

金谷和至教授が定年退職した（2020年3月31日）。

伊敷吾郎博士がテニユアを獲得し、数理物質系准教授に昇任した（2019年9月1日）。

新谷栄悟博士が計算科学研究センター研究員として着任した（2019年12月1日）。

賀数淳平博士が数理物質系博士研究員として着任した（2019年4月1日）。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の2つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、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、 $K \rightarrow \pi\pi$ 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・研究開発が始まった。9つの重点課題が設定され、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 – 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。重点課題・萌芽の課題とともに2019年度末で終了した。ポスト「京」の名称は正式に「富岳」と決定し、2021年度以降に一般利用が開始される予定である。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。行列正則化、ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究、非臨界次元の弦の理論等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

## 【1】格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、浮田 尚哉、賀数 淳平、新谷 栄悟、吉村 友佑)

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

2016年秋にJCAHPCにおいてOakforest-PACS(OPF)が導入され、稼働を開始した。OPFはピーク演算性能が25PFlopsであり、HPC向けとしては「京」コンピュータを抜いて現在日本最速のスーパーコンピュータである。昨年度に引き続き、本年度もPACS Collaborationに基づく共同研究体制のもと、OPF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置ける物理量計算は”テラーメイド”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。OPF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 $(10\text{fm})^3$ 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。

2018年度は、格子サイズ $128^4$ と $64^4$ (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 $\pi$ 、 $K$ メソン質量と崩壊定数の計算を行い、両格子サイズ上での結果を比較することによって、それらの物理量に対する有限サイズ効果(系統誤差の一つ)を定量的に評価した。2019年度は、より計算が困難なベクターメソン質量とバリオン質量の高精度計算を実現し、それらの有限体積効果の定量的解析に成功した。図1(左)は、格子サイズ $128^4$ と $64^4$ の配位上で計算された $\rho$ メソンの2点相関関数 $C_\rho(t)$ を用いて、それぞれについて時間 $t$ における $\rho$ メソンの局所有効質量 $m_\rho^{\text{eff}}(t) = \ln(C_\rho(t)/C_\rho(t+1))$ をプロットしたものである。黒シンボルは $128^4$ 格子サイズの結果で、赤シン

ボルは  $64^4$  格子サイズの結果である。両データは統計誤差の範囲で重なっているため、有限サイズ効果は無視できることがわかる。局所有効質量は時間とともに単調減少していることが見て取れるが、これは  $\rho$  メソンが不安定粒子(共鳴状態)であり、2つの  $\pi$  メソンへの崩壊が許されているためである。参考のために、オレンジ色の水平線は実験的に観測されている  $\rho$  メソンのエネルギーを表している。図1(右)は、格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  の配位上で計算された三バリオンの局所有効質量を時間の関数としてプロットしたものである。この場合も、異なる格子サイズのデータが重なっているため、有限サイズ効果は無視できることがわかる。三バリオンは強い相互作用で安定な(崩壊しない)粒子であるため、 $t \geq 8$  の領域においてプラトー的振る舞い(局所有効質量が時間に依存しない)を確認できる。青い横棒は2点相関関数をフィットすることによって求めた三バリオンの質量を表しており、格子間隔決定のためのインプットとして用いている。その他のベクターメソン質量やバリオン質量においても、格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  の配位上での計算の結果、有限サイズ効果は無視できるレベルであった。これらの結果は、既に論文 [1] で発表済みである。

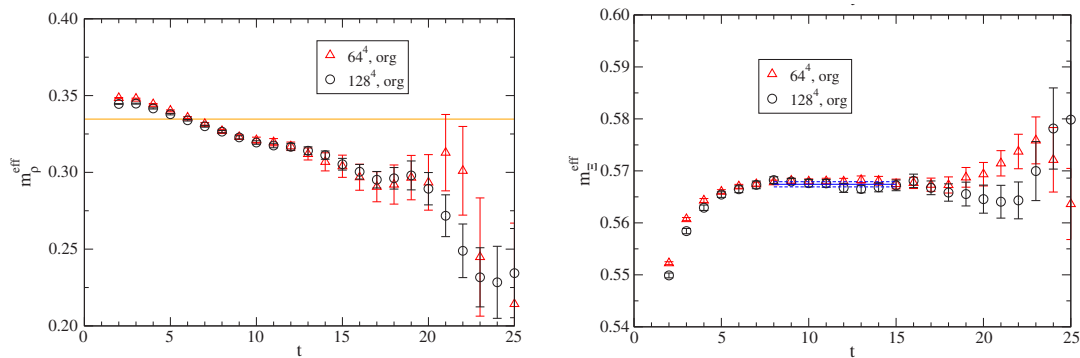


図 1: 格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  における  $\rho$  メソン局所有効質量(左)と三バリオン局所有効質量(右)。

## (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、そのうち 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エ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  $\pi$  中間子質量  $0.5 \text{ GeV}$  と  $0.3 \text{ GeV}$  のクォーク質量を用いたものであり、物理点 ( $\pi$  中間子質量  $0.14 \text{ GeV}$  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  $96^4$  格子サイズのゲージ配位を用いた現実に近い  $\pi$  中間子質量  $0.146 \text{ GeV}$  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 (図 2 の左図)。今後は計算コード高速化及び計算方法の改良など、統計誤差を小さくする方法の研究を行う。

また、指数型演算子を用いたこれまでの計算に含まれる励起状態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い、この系統誤差は十分小さいと考えられる結果を得た。さらに、ウォール型演算子の有効エネルギー差の体積依存性を調べ、2核子散乱状態、核子-励起核子散乱状態を考慮した解析から、ウォール型演算子を用いた結果には散乱状態の寄与が体積に比例して大きくなることを示唆する結果 (図 2 の右図) を得た。

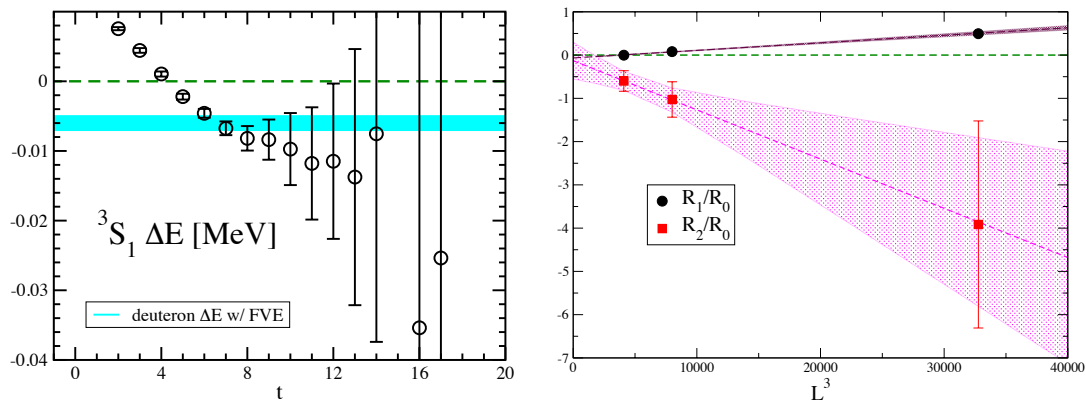


図 2: (左) 現実に近いクォーク質量で指数型演算子を用いた有効二核子エネルギー差。横軸は虚時間、水色帯は有限体積効果を考慮した実験値。(右) 重いクォークでのウォール型演算子を用いた、有効二核子エネルギーに含まれる束縛状態に対する散乱状態の割合の体積依存性。茶色と桃色破線はフィット結果。

### (3) 格子 QCD を用いた核子構造研究

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。

藏増、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 新谷栄悟氏、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 ( $\pi$  中間子質量 146 MeV) 及び現実的クォーク質量直上で核子形状因子計算を行った。2019 年度は核子スカラー電荷と核子テンソル電荷のための繰り込み計算を終了させそれぞれの物理的値を決定し、これまでの結果と比較し遜色ないことを確認した (論文 3)。

また、現実的クォーク質量直上での形状因子計算の間違いを修正した結果、荷電半径計算には数パーセントの系統誤差が含まれる可能性を示唆した。この系

統計誤差の原因を理解するため、異なる格子間隔を用いた計算から、有限格子間隔による系統誤差の大きさを調査する予定である。

(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

賀数研究員と山崎は現実クォーク質量での K 中間子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  $V_{us}$  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ので、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。

図 3 に示すように、本研究で得られた  $|V_{us}|$  (赤丸) は、これまでの多くの計算結果 ( $K_{l3}$   $N_f = 2 + 1 + 1$ ,  $N_f = 2 + 1$ ) と異なり、標準理論から予測される値 (灰色帯) と無矛盾な結果になった (論文 6)。さらに本研究結果は K 中間子レプトニック崩壊から決定される  $|V_{us}|$  (青丸、緑星) とも一致しており、標準模型を超える物理のシグナルに対しては否定的な結論を示唆している。しかし、近年の標準模型の予測では図中の灰色帯を超えた大きな  $|V_{us}|$  が報告されており、標準理論を超える物理の検証を行うために、さらに精密な計算結果を得る必要がある。今後は、本研究結果で最も大きな系統誤差を与えた有限格子間隔起因の系統誤差を取り除くべく、連続極限への外挿を行うために、異なる格子間隔での計算を実行する計画である。

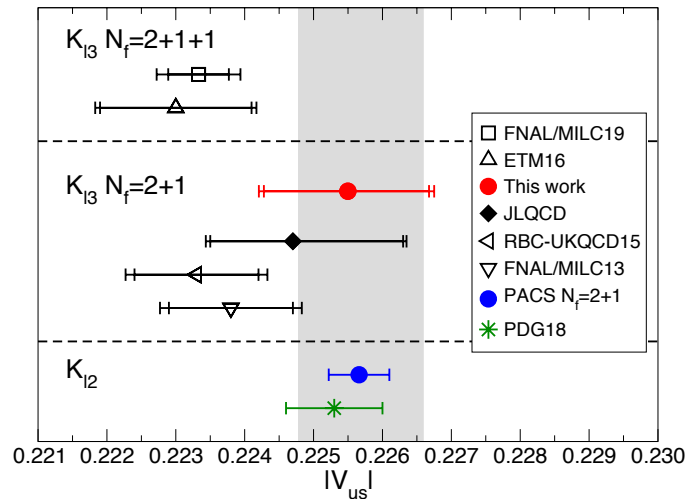


図 3:  $|V_{us}|$  の比較。灰色帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

(5) 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

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。これまで散乱長は、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計算されてきた。KEK 滑川研究員と山崎は 2 パイ中間子系におい

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。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を確認した。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。さらに散乱振幅のパイ中間子質量依存性を調べ、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した (論文 7)。

(6) 改良 Wilson クォークを用いた格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究

ビッグバン直後の宇宙初期に実現したと考えられるクォーク・グルオン・プラズマ状態から通常のハドロン物質への相転移前後のクォーク物質の様々な熱力学的性質は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明において重要である。これは本質的に非摂動的な問題であり、格子 QCD による QCD 第一原理からの大規模シミュレーションが不可欠である。クォーク物質の相構造や熱力学特性を引き出すために、有限温度・有限密度格子 QCD を研究し、またそのための技術開発を進めた。

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、改良ウィルソン型格子クォークを用いた有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究を行なっている。2019 年度も、QCD の相構造やクォーク物質の熱力学的諸性質の共同研究を推進した。

有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究の多くは、計算量が少ないスタガード型格子クォークを用いて行われているが、連続極限で QCD を再現することが証明されていないという本質的な問題を孕んでいる。我々は、理論的基礎が確立している Wilson 型格子クォークを用いて QCD 相転移近傍の温度でクォーク物質がどのような熱力学特性を示すかの大規模シミュレーション研究を推進している。Wilson 型クォークは、連続極限の正しさが保証されている反面、有限の格子上ではカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に関して格子化誤差が大きく、それを取り除いて物理量を計算するために膨大な計算資源が要求されるという困難があった。また、並進対称性に伴う保存カレントとして定義されるエネルギー運動量テンソルは系の力学特性を調べる上で基本的な観測量だが (例えば、対角成分はエネルギー密度や圧力などの情報を含み、2 点相関関数から様々な粘性率が導かれる)、格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、複雑な繰り込み操作を行わなければ意味のある評価が出来なかった。

我々は、Gradient flow (勾配流) に基づいて鈴木博らにより開発された SFtX 法 (small flow-time expansion method) を応用して、これまでの課題を克服した大きなブレークスルーを目指している。勾配流とは、仮想的な時間パラメータ  $t$  (flow-time) を導入して一種の拡散方程式により場の量を変形させる手法で、 $t > 0$  ではフローさせた演算子が紫外発散も同一点特異性も持たないという目覚ましい特性を持っている。SFtX 法は、勾配流のこの有限性を活用して、連続極限のくりこまれた物理量に対応する量を格子上で評価する一般的な計

算方法である。格子化により有限格子上では陽に壊されてしまう対称性と結びついた物理量でも直接評価できる。

クォークを無視したクエンチ近似 QCD による試験研究によって、SFtX 法の有用性が示されている。我々は、SFtX 法が並進対称性の破れだけでなく、Wilson 型クォークによるカイラルの破れの困難にも有効であることに着目し、2+1 フレーバーの動的なクォークを含む現実的 QCD に SFtX 法を応用した一連の研究を推進している。

2016-2017 年度に実行した u,d クォークが現実よりやや重い場合の  $N_f = 2 + 1$  QCD 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の結果を良く再現することを示し、さらに、カイラル感受率がクローズオーバー温度でピークを示すことを Wilson 型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を、グルオンを用いた定義式と、それを、連続理論のカイラル関係式を用いてクォークを用いて表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを示した。通常の計算方法でスタガード型クォークを用いた研究では、この程度の格子間隔では両者は 2 桁も違っており、SFtX 法が物理的に信頼できる結果を得る上で極めて有用であることをあらわしている。

2018 年度からは、この研究を発展させ、現実のクォーク質量（物理点）での研究、及び、u,d クォークが重い場合に格子間隔を変えたシミュレーションを推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減ができたが、物理点や格子間隔が細かい格子の配位生成には膨大な計算が要求され、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを遂行している。

2019 年度には、SFtX 法の改良として、くりこみスケールの研究と、マッチング係数における高次項の効果の研究、エネルギー運動量テンソルの相関関数の研究などを  $N_f = 2 + 1$  QCD で行った。また、再重み付け法を用いたクォークが重い極限近くの  $N_f = 2 + 1$  QCD の相構造の研究を進め、重クォーク展開の高次項の効果や格子間隔依存性の研究を行った。

#### SFtX 法におけるくりこみスケールの研究

SFtX 法では、格子上で測った  $t > 0$  のフローさせた演算子と求める物理量をマッチング係数で結びつけ、 $t \rightarrow 0$  の極限を取ることにより、物理量を計算する。QCD を含む漸近自由な理論では、 $t \rightarrow 0$  の極限近傍で、マッチング係数を摂動論により評価することができる。マッチング係数を計算するときのくりこみスケール  $\mu$  は、計算の摂動計算が破綻しない限り、どんな値を取っても良く、最終的な物理量の結果は  $\mu$  に依存しないはずである。通常は、フローさせた演算子の自然なスケールの一つである  $\mu_d = 1/\sqrt{8t}$ （これは勾配流により場が平均化される領域の拡がりの逆数に等しい）を取るが、それと同程度の  $\mu$  ならば、何をとっても良い。

他方、摂動展開の質は、 $\mu$  をどう取るかで変化する。SFtX 法で  $t \rightarrow 0$  外挿を実行する上で、どこまで大きな  $t$  を利用できるかは実用上重要である。 $\mu_d = 1/\sqrt{8t}$  の形から分かるように、 $t$  を大きくすると赤外領域に近づき、マッチング係数

の摂動計算が破綻する。

我々は、現実のクォーク質量（物理点）での研究を、PACS-CS Collaboration のゼロ温度配位が生成された格子間隔 0.09fm の格子で進めている。この研究や、u,d クォークが重い場合に格子間隔を粗くした研究において、いくつかの物理量に関して、 $t \rightarrow 0$  外挿を行うための線形領域が十分見えなくなるといふ現象を経験した。その一つの要因として、格子間隔がやや粗くなったために、摂動計算が破綻する無次元の flow-time  $t/a^2$  が小さくなってしまい、 $t \rightarrow 0$  外挿の十分な領域を確保できなくなったことが考えられる。

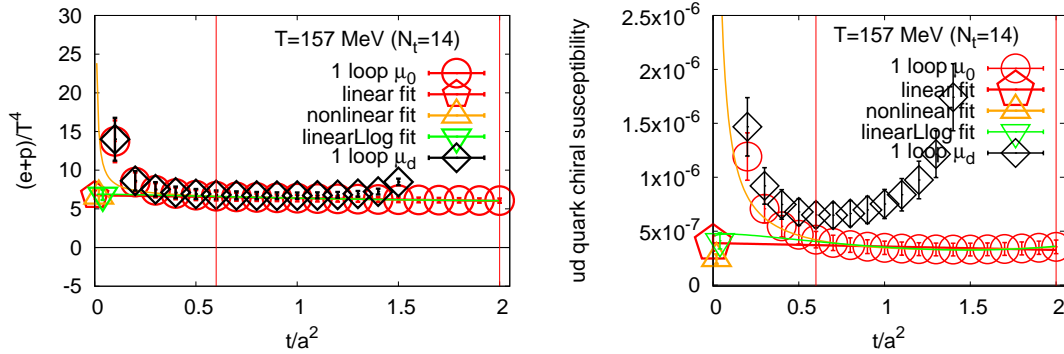


図 4: グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究: 現実のクォーク質量におけるくりこみスケール依存性。左図: エントロピー密度  $\epsilon + p$ 。右図: ud クォークのカイラル感受率の非連結部分。  $T = 157$  MeV での結果。横軸は無次元の flow-time  $t/a^2$  で、物理的結果は  $t \rightarrow 0$  外挿によって得られる。(論文 12)

図 4 に、くりこみスケールとして、従来の  $\mu_d$  を使った結果と、最近提案された  $\mu_0 = 1/\sqrt{2e^{\gamma_E}t}$  ( $\gamma_E$  はオイラー数) を使った結果を比較する。左図は、エントロピー密度  $\epsilon + p$  の flow-time 依存性。右図は、ud クォークのカイラル感受率 disconnected part 依存性。  $\mu_d$  を使った結果が  $t/a^2 \leq 1.5$  までしか無いのは、そこで running coupling が大きくなってしまい、摂動展開が破綻するからである。  $\mu_0 \simeq 1.5 \mu_d$  では、  $t/a^2 \leq 3$  まで摂動計算可能である。左図より、  $\mu_0$  スケールにより、より安定した  $t \rightarrow 0$  外挿が可能であり、その結果は  $\mu_d$  による  $t \rightarrow 0$  外挿と一致していることがわかる。右図より、  $\mu_d$  スケールでは  $t \rightarrow 0$  外挿をどのようにとって良いかわからない場合でも、  $\mu_0$  スケールにより  $t \rightarrow 0$  外挿が可能となる場合があることがわかる。(論文 12)

#### SFtX 法を用いた物理点有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

上記の結果を得て、  $\mu_0$  スケールを採用して物理点有限温度 (2+1)-flavor QCD の熱力学量を評価したものが、図 5 である。ただし、  $T \simeq 122-146$  MeV のシミュレーションは、まだ進行中で、統計が十分ではない。また、ud クォークがやや重い場合の経験から、  $T > 247$  MeV ( $N_t \leq 8$ ) では格子化誤差が小さくないと予想される。

図 5 や、他の物理量の挙動から、  $T \simeq 122-146$  MeV が相転移温度近傍の臨界



領域にあることが示唆される（論文 12）。精密な相転移温度を得るために、この温度域でのシミュレーションを推進中である。

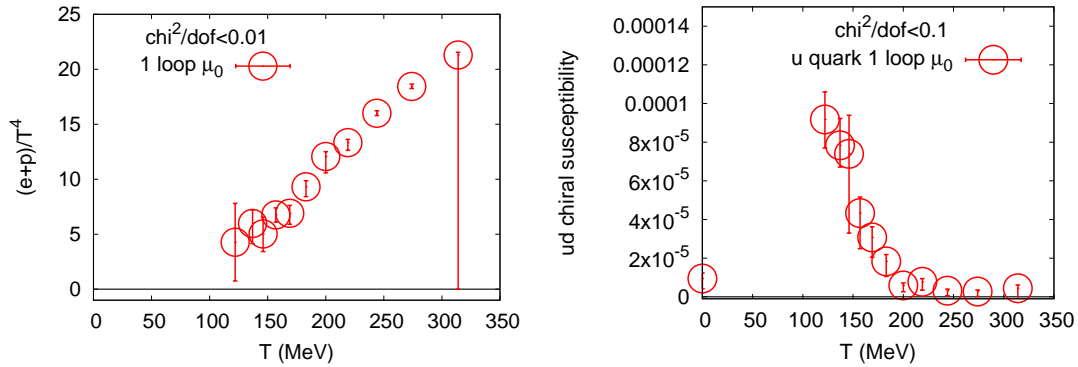


図 5: グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究: 現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。左図: エントロピー密度  $\epsilon + p$ 。右図: トレース・アノマリ  $\epsilon - 3p$ 。横軸は温度  $T$ 。(論文 12)

### SFtX 法における高次マッチング係数の効果の研究

上記の研究は、マッチング係数の 1 ループ摂動計算の結果を用いたものだが、最近、エネルギー運動量テンソルに関するマッチング係数の 2 ループ計算の結果が公表された (R.V. Harlander *et. al*, Eur. Phys. J. C78, 944 (2018))。図 6 でその効果を研究した。 $\mu_0$  スケールを採用し、統計が十分ある、u,d クォークが現実よりやや重い場合で試験した。左図のエントロピー密度では、1 ループの結果と 2 ループの結果がよく一致していることがわかる。他方、中央図のトレース・アノマリでは、 $T > 250$  MeV でズレが見える。

実は、Harlander らの 2 ループ計算では、クォークの運動方程式を使って独立な演算子を減らしている。クォークの運動方程式はエネルギー運動量テンソルの対角成分にのみ作用するので、エントロピー密度には影響しないが、トレース・アノマリには効果がある。運動方程式は、SFtX 法で連続極限外挿を行なった後では効果が無いはずだが、有限格子では格子化誤差を持ちうる。高温領域でのズレの原因を明確にするために、Harlander らのマッチング係数の 1 ループ部分だけを取り出してトレース・アノマリを評価したものが、図 6 の右図である。これから、ズレはクォークの運動方程式によるものであることがわかる。この結果は、 $N_t \leq 10$  の格子では、運動方程式に無視できない格子化誤差があることを示唆している。

なお、中央図と右図の比較から、運動方程式を使った 1 ループの結果と 2 ループの結果はよく一致しており、左図のエントロピー密度と同様に、マッチング係数の高次項の効果そのものは小さいことが結論できる。(論文 12)

### SFtX 法による PCAC クォーク質量の研究

SFtX 法を用いれば、カイラル対称性と関係した他の様々な物理量も Wilson 型クォークで直接評価できると期待している。今回は、ud クォークが現実より

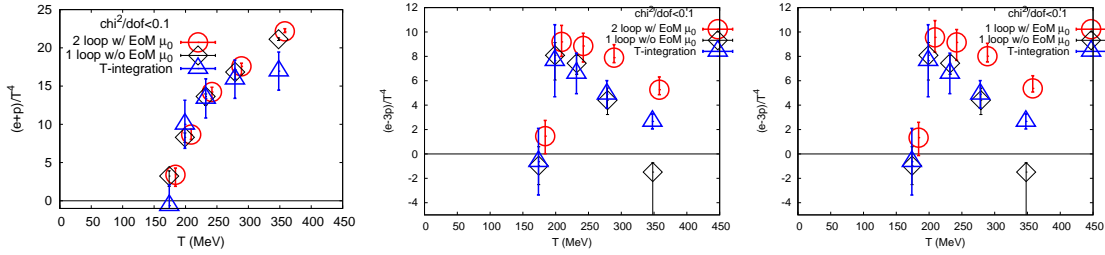


図 6: グラジエントフローに基づく SFtX 法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究：ud クォーク質量がやや重い QCD の結果。2 ループ マッチング係数の効果。左図：エントロピー密度  $\epsilon + p$ 。中央図、右図：トレース・アノマリ  $\epsilon - 3p$ 。右図では、1 ループ マッチング係数で、運動方程式を使った結果との比較。横軸は温度  $T$ 。(論文 12)

やや重い場合のゼロ温度格子で、クォークの PCAC 質量を SFtX 法により評価した。図 7 に、ud クォーク質量および s クォーク質量の  $t \rightarrow 0$  外挿を示す。SFtX 法によるクォーク質量が、通常の Schrödinger 汎関数法による結果とよく一致していることがわかる(論文 17)。これを発展させて、SFtX 法による K 中間子バググパラメータ  $B_K$  の計算を行い、CP の破れの研究につなげることを目指している(国際会議発表 21)。

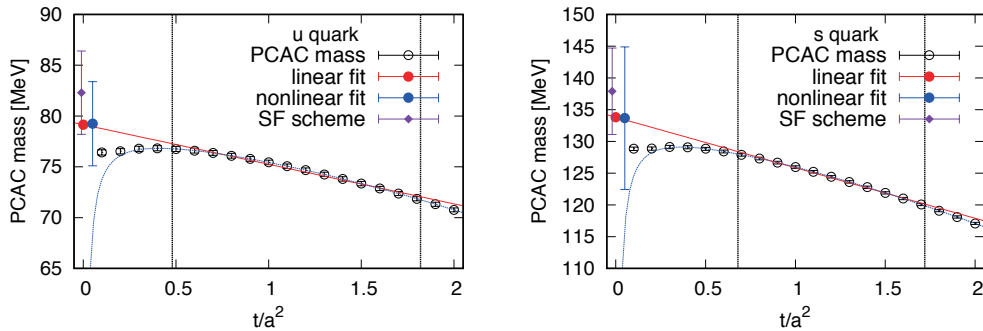


図 7: グラジエントフローに基づく SFtX 法による PCAC クォーク質量。ud クォーク質量がやや重い QCD の結果。左図：ud クォーク質量。右図：s クォーク質量。横軸は無次元の flow-time  $t/a^2$  で、物理的結果は  $t \rightarrow 0$  外挿によって得られる。(論文 17)

### 再重み付け法によるクォークが重い極限近くの $N_f = 2 + 1$ QCD の相構造の研究

また、再重み付け法を用いたクォークが重い極限近くの  $N_f = 2 + 1$  QCD の相構造の研究を進め、重クォーク展開の高次項の効果や格子間隔依存性の研究を行った。(論文 18)

図 8 に、クォークが重い極限近くの  $N_f = 2 + 1$  QCD の相構造の結果を示す。縦軸は ud クォーク質量の逆数に対応する ud クォーク ホッピングパラメータで、横軸は s クォーク質量の逆数に対応する s クォーク ホッピングパラメータ。原点はクォーク質量 =  $\infty$  の純ゲージ QCD で、有限温度相転移が 1 次相転移であることが知られている。クォーク質量を小さくしていくと、有限温度

QCD 相転移が連続的なクロスオーバーに変わる。両者を区別する臨界線の位置を、再重み付け法を使ってポリアコフ・ループの分布関数の変化から計算した結果が、図 8 に示されている。 $N_f = 2$  QCD でのシミュレーション結果を、重クォーク展開を用いて  $N_f = 2 + 1$ QCD の相構造に一般化した。

重クォーク展開の最低次を取り入れた再重み付け法の結果 (赤線) が、重クォーク展開のその次の次数の効果を取り入れると、緑線の位置に変化する。左図は  $N_t = 4$  格子での結果で、格子間隔がより小さい  $N_t = 6$  格子では、右図のようになる。これから、格子間隔依存性がまだ大きく、また、連続極限に近づくにつれて重クォーク展開の収束性が悪くなることがわかる。定量的な予言を行うためにはさらに  $N_t$  を大きくすることが必要だが、有限密度研究では計算コストを抑える上で重クォーク展開が有用であり、より高次の重クォーク展開でどこまで改良できるかが、次の研究の一つの方向性と考えられる。

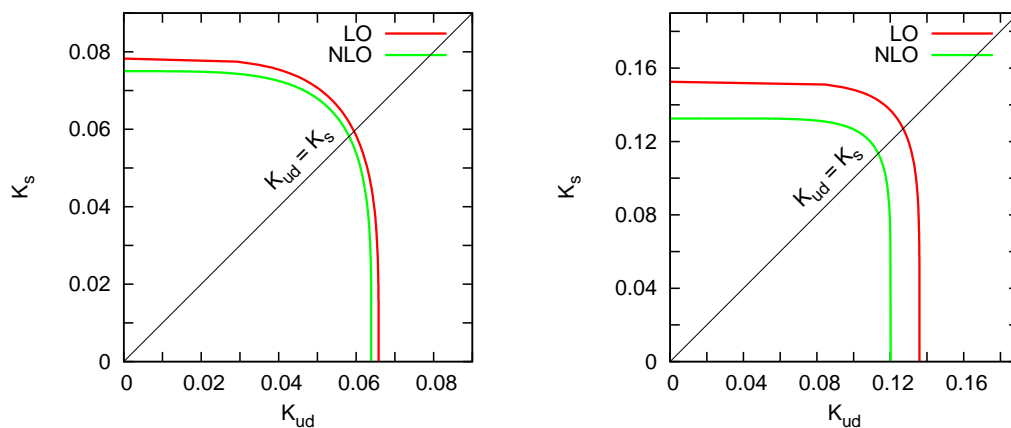


図 8: 再重み付け法によるクォークが重い極限近くの  $N_f = 2 + 1$ QCD の相構造。縦軸は ud クォーク ホッピングパラメータで、横軸は s クォーク ホッピングパラメータ。 $K = 0$  がクォーク質量  $= \infty$  に対応する。有限温度 QCD 相転移が、原点近傍では 1 次相転移だが、右上領域ではクロスオーバーとなり、2 つの領域の境界となる臨界線が示されている。LO は重クォーク展開の最低次を取り入れた再重み付け法の結果で、NLO はその次の次数の効果を取り入れた結果。左図:  $N_t = 4$  格子。右図:  $N_t = 6$  格子。(論文 18)

### その他

SFtX 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た (論文 14, 国際会議発表 21, 28)。

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。SFtX 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 (論文 13)。

- (7) Wilson 型クォークを用いた 3、4 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点の研究

有限温度 QCD の相構造は、クォークの質量やフレーバー数に応じて多様に変化すると予想されている。特に、3 フレーバーでは、クォーク質量ゼロの極限で一次相転移があり、質量を大きくしていくと、二次相転移となる臨界終点を経て、クロスオーバーになると考えられている。このことを確かめるため、格子 QCD に基づく第一原理計算により 3 フレーバーにおける臨界終点の位置を調べる多くの研究が行われてきた。しかしながら、連続極限の取り方やクォーク作用の種類・改良方法でその結果が大きく異なり、未だに最終的な結論が得られていない。従って、より正確な 3 フレーバー QCD における臨界終点の位置の決定や、例えば 4 フレーバー QCD といった、異なる視点からの研究が必要である。

大野と藏増は、金沢大の武田真滋准教授及び理化学研究所の中村宜文研究員とともに、3、4 フレーバー QCD の臨界終点の位置を、 $O(a)$  改良された Wilson クォーク作用を用いた格子 QCD シミュレーションにより調べた。まず、3 フレーバー QCD では、これまでの研究で行った、時間方向格子サイズ 4,6,8 及び 10 の計算を 12 まで拡張し、より正確な連続極限での臨界終点の位置を推定した。その結果、図 9 に示す通り、臨界終点における  $\pi$  中間子質量の上限値として、これまでよりもさらに小さい値を得た (論文 19)。次に、4 フレーバー QCD の研究では、時間方向格子サイズ 4,6 及び 8 の計算を行い、連続極限での臨界終点の位置を推定し、3 フレーバーの結果や異なるクォーク作用での結果と比較した。現在この研究成果をもとに論文を執筆中であり、より正確な結果を得るため、時間方向格子サイズを 10 まで拡張した計算も遂行中である。

(8) Highly improved staggered quark を用いた有限温度・密度 QCD の研究

有限温度・密度 QCD の相構造について調べることは、強い相互作用する物質の高温・高密度媒質中での性質を理解する上で非常に重要である。

大野は、独国 Bielefeld 大の Frithjof Karsch 教授を中心とする HotQCD Collaboration に参加し、highly improved staggered quark 作用を用いた (2+1)-flavor 格子 QCD シミュレーションにより、有限温度・密度 QCD についての様々な研究を行った。まず初めに、ゼロ及び有限 baryon、strangeness、electric charge そして isospin chemical potential における chiral crossover を調べた。その結果、擬転移温度の各 chemical potential に対する Taylor 展開の 2 次及び 4 次の係数と、ゼロ密度における値を決定した。その際、ゼロ密度における擬転移温度の精密な値として、 $156.5 \pm 1.5$  MeV を得た (論文 20)。次に、 $\pi$  中間子質量ゼロの極限における相転移温度を調べた。図 10 に示す様に様々な系統誤差を考慮した結果、連続極限・無限体積極限の値として、 $132^{+3}_{-6}$  MeV を得た (論文 22)。最後に、中間子遮蔽質量を幅広い温度領域で調べた。連続極限を取ることで得られた結果を用いて、高温領域における様々な対称性の回復についての議論や、摂動計算との比較を行った (論文 23)。

(9) クォーコニウムスペクトル関数の研究

チャームやボトムクォークといった重いクォークとその反クォークの束縛状態であるクォーコニウムのスペクトル関数は、高温媒質中でのクォーコニウムの

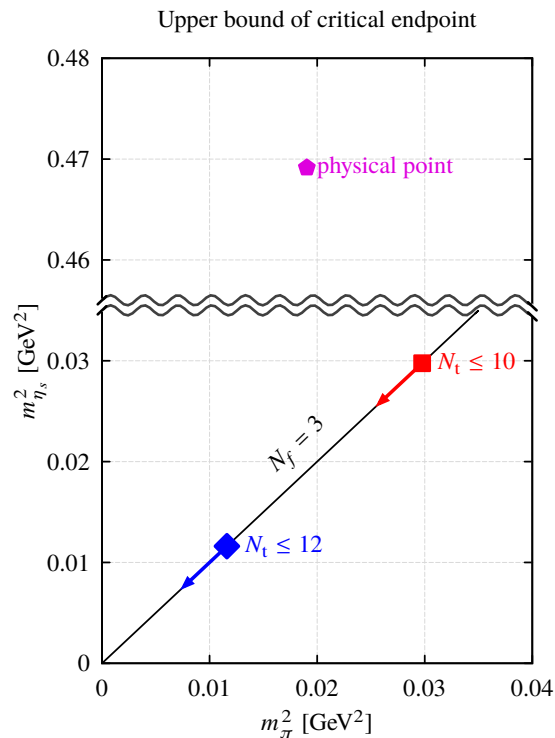


図 9: 3 フレーバー QCD における臨界終点の位置。

振る舞いや重クォーク輸送に関する情報をすべて含んでおり、理論的にその性質を調べることは、重イオン衝突実験の結果を理解する上で非常に重要である。しかしながら、格子 QCD に基づく第一原理計算で直接得られる量は相関関数であり、相関関数からスペクトル関数を計算することは ill-posed な問題で、解くことが非常に困難であることが知られている。従って、より信頼できるスペクトル関数を計算するために、様々な方法が試みられている。

大野は、中国華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、独国 Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 博士らとともに、クエンチ近似を用いた大規模な格子 QCD シミュレーションにより、連続極限におけるクォークonium 相関関数を計算し、これを摂動論的モデルにフィットさせることで、クォークonium スペクトル関数を計算した。過去の計算では、手始めに輸送ピークの存在しない擬スカラーチャンネルのスペクトル関数を計算したが、今年度はこれをベクターチャンネルに拡張した (論文 21)。その結果、モデルスペクトル関数は、相関関数をよく表せることを確認した。今後はより詳細な解析により、輸送ピークの影響等を調べる予定である。

#### (10) 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

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  $u$ 、 $d$ 、 $s$  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、

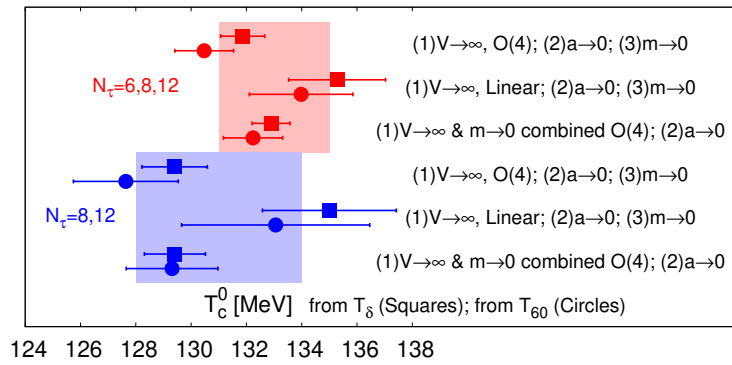


図 10:  $\pi$  中間子質量ゼロの極限における相転移温度。

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 – 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、 $\theta$  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、(iv) 興味深い低次元素粒子論モデルへの応用、という 4 つの課題に取り組む。

2019 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)、(iv) : 2 次元の  $\theta$  項（トポロジカル項）入り U(1) 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、U(1) ゲージ理論における連続変数の積分に対して Gauss 求積法を適用し、 $\theta = \pi$  における一次相転移の解析に成功した。図 11(左) は、オーダーパラメータであるトポロジカルチャージ  $\langle Q \rangle$  の  $\theta = \pi$  における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、連続変化から不連続変化へと移行していくことが確認できる。現在論文を学術雑誌に投稿中である(論文 [28])。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かった。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と磁化を計算し、その温度・体積依存性を詳細に調べることによって、相転移の次数が従来予想されていた2次ではなく1次であることを見出した。図11(右)は、内部エネルギーの転移点における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、ギャップが形成されることがわかる(論文 [26])。

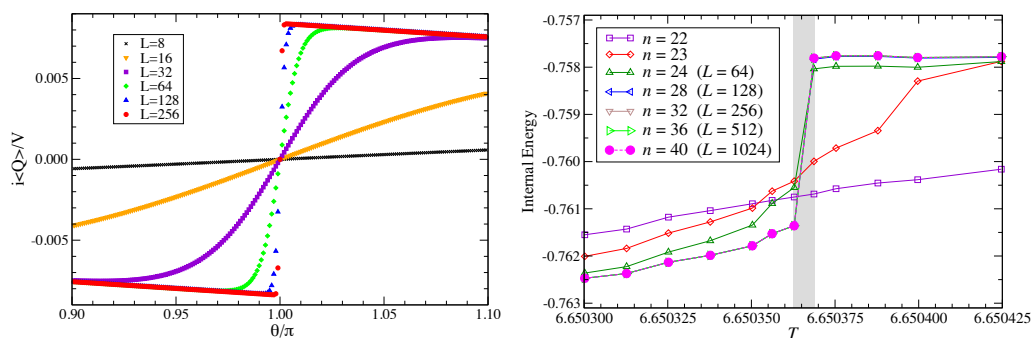


図 11: (左)2次元  $\theta$  項入り  $U(1)$  ゲージ理論の  $\theta = \pi$  におけるトポロジカルチャージ  $\langle Q \rangle$  の体積依存性。(右)4次元 Ising モデルの転移点における内部エネルギーの体積依存性。

## (11) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

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。2019年度は、フレーバー1重項スカラー中間子及びフレーバー1重項擬スカラー中間子の質量について、4、8、12フレーバー理論の比較を行った。

## (12) 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG の運用

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。国内の主要な7

つの研究拠点に配したファイルサーバを国立情報学研究所が運用する SINET5 VPN で結び、グリッド技術によって、単一のファイルシステムを構成し、研究者に提供している。その運用は、参加拠点の担当者から構成される管理者グループが行っているが、代表は本学計算科学研究センターが務めている。2008 年に実運用を開始して以来 10 年以上経過した現在、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。

日常のメンテナンス・ユーザ対応以外の主な活動は、以下の通りである。

- (a) 新拠点設置：JLDG の新拠点を『理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS)』に立ち上げる事となり、R-CCS 担当者と協力し、関係機関との調整・規則策定と、機器・ネットワーク設計を行った。2019 年度末時点で、機器調達が完了し、ネットワーク設定を残すのみである。
- (b) システム増強・機器更新：筑波大計算科学研究センター (CCS) 拠点に 2 台 (600TB) のファイルサーバを増設し、システム全体で 13PB となった。同拠点のネットワーク機器を更新した (旧機器の EOL による)。
- (c) 筑波大 CCS 拠点のスーパーコンピュータ cygnus に JLDG クライアント機能を導入する計画を推進した。2019 年度末の時点で、システム導入を完了し、関連委員会との最終調整を実施中である。
- (d) 格子 QCD 配位の一般公開：PACS Collaboration の依頼を受け、京コンピュータでの物理クォーク質量に近い点のシミュレーションによって生成された格子 QCD 配位を JLDG/ILDG の枠組みで、世界の研究者コミュニティに公開した。
- (e) 格子 QCD アンサンプルの DOI 登録：前年度策定した規約に基づき、実データへの DOI 登録の準備を進めた。

## 【2】超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、毛利 健司)

### (1) 行列正則化の研究

超弦理論の非摂動的定式化として提案された行列模型において、超弦理論の弦や D-brane といった物体は、行列の配位によって表される。この間の関係は行列正則化と呼ばれる。与えられた物体に対して、対応する行列の配位を構成する方法 (行列正則化の構成方法) は、Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる数学的手法によって与えられることが知られている。伊敷は松本高興研究員 (Dublin Institute for Advanced Studies) と共に、行列正則化における微分同相写像の理解をまとめ、論文 31 に発表した。また、行列正則化は従来電荷を持たない場にしか適用できないものであったが、伊敷と大学院生の足立、齊藤は、松本研究員と共に、この手法を電荷を持つ場に対しても適用できるよう一



般化した (論文 32)。これにより、電荷を持つ場が自然に現れる D-brane 上の物理と、行列模型の関係がより明らかになると期待される。

## (2) 境界を持つ 2 次元重力理論と行列模型の関係

2 次元重力理論は、あるシンプルな行列模型によって記述できることが古くから知られていた。伊敷は、Chaiho Rim 教授 (Sogang 大学)、村木久祥研究員 (Sogang 大学) らと共に、この重力理論の定義される空間が、境界を持つ場合の対応関係を研究した (論文 33)。その結果、重力理論の物理量が、行列模型から導かれる代数方程式を満たすことを発見した。またこの方程式を用いて、境界上に定義された物理量が全て、空間内部に定義された物理量から導かれることを初めて証明した。

## (3) 行列模型と Little string theory の関係

弦理論には NS5-brane と呼ばれる基本的な物体が存在することが知られている。しかしながら、この物体がどのような原理に従って運動するのは、まだよくわかっていない。一方、BMN 行列模型と呼ばれる行列模型には、この NS5-brane を記述すると予想されている極限がある。この極限が本当に存在し、その極限で行列模型を解析することができれば、NS5-brane を支配する原理を理解することができる。そのような背景に基づいて、伊敷と大学院生の渡辺は、松本高興研究員 (Dublin Institute for Advanced Studies)・浅野侑磨研究員 (高エネルギー加速器研究機構) らと共に、BMN 行列模型の予想された極限の存在を、数値的に検証し、極限の存在と矛盾しない結果を得た。

## (4) ゲージ理論における部分的閉じ込め相について

伊敷・渡辺は、花田政範研究員 (Southampton 大学) と共に、前年度にラージ N ゲージ理論における部分的閉じ込め相の存在を提唱した。この現象は、ラージ N ゲージ理論の非閉じ込め相転移の過程でカラーの自由度が非閉じ込め領域と閉じ込め領域へ二相分離する現象である。この現象はゲージ/重力対応を通じて、負の非熱を持つブラックホールが存在する時空を記述できると期待されている。本年度はこの部分的閉じ込め相の提案とその性質をまとめ、研究発表を行った (論文 34)。今年度、渡辺はこの研究をさらに推し進め、前述の花田研究員に加え、Bergner 研究員 (Jena 大学)、Bodendorfer 研究員 (Regensburg 大学)、Rinaldi 研究員 (理研 iTHEMS, Arithmer 社) らとともに gauged-Gaussian 行列模型という解析的に解ける模型を解析的および数値的に調べ、部分的閉じ込め現象の記述方法を議論した。そこで得られた結果をゲージ/重力対応において重要な bosonic BFSS 行列模型に適用することで上記の二相分離現象を確認し、部分的閉じ込め相が存在する強い証拠を得た。

## (5) 非臨界次元の弦の場の理論

非臨界次元の弦の理論は、行列模型を用いて厳密に解くことができる。最近、非臨界次元の弦の理論のある極限が JT gravity と呼ばれる 2 次元の重力理論で記述できることがわかってきた。この 2 者の AdS/CFT や弦の場の理論との関係から最近非常に活発に議論されている。石橋は、非臨界次元の弦について

これまで知られている弦の場の理論を用いて、JT gravity に対応する極限がどのように記述されるかを調べた。

## 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, Finite size effect on vector meson and baryon sectors in 2+1 flavor QCD at the physical point, Phys.Rev. D100 (2019) no.9, ref.094502.
2. PACS Collaboration: Eigo Shintani and Yoshinobu Kuramashi, Hadronic vacuum polarization contribution to the muon  $g - 2$  with 2+1 flavor lattice QCD on a larger than  $(10 \text{ fm})^4$  lattice at the physical point, Phys.Rev. D100 (2019) no.3, ref.034517.
3. Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point, PoS(LATTICE2019) (2020) 132, pp.1-7.
4. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration, Calculation of  $K \rightarrow \pi l \nu$  form factor in  $N_f=2+1$  QCD at physical point on  $(10 \text{ fm})^3$ , PoS(LATTICE2018) (2019) 265, pp.1-7.
5. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration,  $K_{l3}$  form factors in  $N_f = 2 + 1$  QCD at physical point on large volume, PoS(LATTICE2019) (2020) 186, pp.1-7.
6. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration,  $K_{l3}$  form factors at the physical point on  $(10.9 \text{ fm})^3$  volume, Phys. Rev. D101 (2020) no.9, ref. 094504, pp.1-16.
7. Namekawa Yusuke and Takeshi Yamazaki, Quark mass dependence of on-shell and half off-shell scattering amplitudes from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range, Phys. Rev. D 99, No. 11 (2019) ref. 114508, pp.1-16.
8. Namekawa Yusuke and Takeshi Yamazaki, Scattering length from BS wave function inside the interaction range, PoS(LATTICE2018) (2019) 078, pp.1-7.

9. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory, PoS(LATTICE2018) (2019) 077, pp.1-7.
10. Takeshi Yamazaki, Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range, Springer Proceedings Physics 238 (2020) pp.427-432.
11. Takeshi Yamazaki, Yusuke Namekawa, Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary, PoS(LATTICE2019) (2020) 032, pp.1-7.
12. Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Asobu Suzuki, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow, PoS(LATTICE2019) 088 (2020).
13. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow, PoS (LATTICE 2018) 164 (2019).
14. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takashi Umeda, Study of energy-momentum tensor correlation function in  $N_f = 2+1$  full QCD for QGP viscosities, PoS (LATTICE 2018) 166 (2019).
15. 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(LATTICE2018) 173 (2019).
16. Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Determination of the endpoint of the first order deconfinement phase transition in the heavy quark region, PoS(LATTICE2019) 071 (2020).
17. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow, PoS(LATTICE2019) 191 (2020).
18. Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, and Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy

- quark region by reweighting from quenched QCD, Phys. Rev. D101 (2020) no.5, ref.054505, pp.1-17.
19. Y. Kuramashi, Y. Nakamura, H. Ohno, and S. Takeda, Nature of the phase transition for finite temperature  $N_f = 3$  QCD with nonperturbatively  $O(a)$ improved Wilson fermions at  $N_t = 12$ , Phys. Rev. D 101, no. 5 (2020) ref. 054509.
  20. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, N. Karthik, E. Laermann, Anirban Lahiri, R. Larsen, S.-T. Li, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, H. Sandmeyer, C. Schmidt, S. Sharma and P. Steinbrecher (HotQCD Collaboration), Chiral crossover in QCD at zero and non-zero chemical potentials, Phys. Lett. B 795 (2019) pp.15-21.
  21. Anna-Lena Kruse, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, H. Ohno and H. Sandmeyer, Insight into Thermal Modifications of Quarkonia From a Comparison of Continuum-Extrapolated Lattice Results to Perturbative QCD, MDPI Proc. 10 (2019) ref. 45.
  22. H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, Anirban Lahiri, S.-T. Li, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, and P. Steinbrecher (HotQCD Collaboration), Chiral Phase Transition Temperature in (2+1)-Flavor QCD, Phys. Rev. Lett. 123, no.6 (2019) ref. 062002.
  23. A. Bazavov, S. Dentinger, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Anirban Lahiri, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, R. Thakkar, H. Sandmeyer, C. Schmidt, S. Sharma, and P. Steinbrecher (HotQCD Collaboration), Meson screening masses in (2+1)-flavor QCD, Phys. Rev. D 100, no.9 (2019) ref. 094510.
  24. D. Kadoh, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, R. Sakai, S. Takeda, and Y. Yoshimura, Investigation of complex  $\phi^4$  theory at finite density in two dimensions using TRG, JHEP 2002 (2020) 161.
  25. D. Kadoh, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, R. Sakai, S. Takeda, and Y. Yoshimura, Tensor network analysis of critical coupling in two dimensional  $\phi^4$  theory, JHEP 1905 (2019) 184.
  26. S. Akiyama, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, Phase transition of four-dimensional Ising model with higher-order tensor renormalization group, Phys.Rev. D100 (2019) no.5, ref.054510.
  27. Y. Kuramashi and Y. Yoshimura, Three-dimensional finite temperature  $Z_2$  gauge theory with tensor network scheme, JHEP 1908 (2019) 023.
  28. Y. Kuramashi and Y. Yoshimura, Tensor renormalization group study of two-dimensional U(1) lattice gauge theory with a  $\theta$  term, JHEP 2004 (2019) 089.

29. D. Kadoh, Y. Kuramashi, and R. Ueno, Irregular parameter dependence of numerical results in tensor renormalization group analysis, PTEP 2019 (2019) 061B01.
30. S. Akiyama, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, Phase transition of four-dimensional Ising model with tensor network scheme, PoS(LATTICE2019) (2020) ref.138.
31. G. Ishiki and T. Matsumoto, Diffeomorphisms on the fuzzy sphere, PTEP **2020** (2020) no.1, 013B04 [arXiv:1904.00308 [hep-th]].
32. H. Adachi, G. Ishiki, T. Matsumoto and K. Saito, Matrix regularization for Riemann surfaces with magnetic fluxes, Phys. Rev. D **101** (2020) no.10, 106009 [arXiv:2002.02993 [hep-th]].
33. G. Ishiki, H. Muraki and C. Rim, The null identities for boundary operators in the  $(2, 2p + 1)$  minimal gravity, PTEP **2020** (2020) no.2, 023B07 [arXiv:1911.01737 [hep-th]].
34. M. Hanada, G. Ishiki and H. Watanabe, Partial deconfinement in gauge theories, (to appear in Pos LATTICE 2019) [arXiv:1911.11465 [hep-lat]].

## 学位論文

### [修士論文]

1. 足立 宏幸  
「The Berezin-Toeplitz quantization for the fuzzy torus with a magnetic flux」
2. 齊藤 海秀  
「弦理論のドジッター真空について」
3. 羽山 徹  
「標準模型有効理論におけるミュオン・電子転換過程の計算」

## 研究成果発表（講演）

### [国際会議]

1. Takeshi Yamazaki 「Direct calculation of two-nucleon energy from lattice QCD」(招待講演),  
Frontiers in Lattice QCD and related topics (Kyoto University, Kyoto, April 15-26, 2019).

2. H. Ohno 「Recent progress on in-medium heavy flavor physics from lattice QCD」 (招待講演),  
The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
3. Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration, 「Study of finite size effect on hadron masses and decay constants with  $(5.4\text{fm})^4$  and  $(10.8\text{fm})^4$  lattices at the physical point in 2+1 flavor QCD」,  
The 37th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
4. Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, 「Tensor network study of two dimensional complex  $\phi^4$  theory at finite density」,  
The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
5. Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Takumi Yamashita, and Yusuke Yoshimura, 「Phase transition of 4-dimensional Ising model with higher-order tensor renormalization group」,  
The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
6. Takeshi Yamazaki and Yusuke Namekawa 「Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary」,  
The 37th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, China, June 16-22, 2019).
7. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration 「 $K_{l3}$  form factors in  $N_f = 2 + 1$  QCD at physical point on large volume」,  
The 37th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, China, June 16-22, 2019).
8. Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point」,  
The 37th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, China, June 16-22, 2019).
9. Y. Nakamura, Y. Kuramashi, H. Ohno and S. Takeda 「Critical endpoint in the continuum limit and critical endline at  $N_T = 6$  of the finite temperature phase transition of QCD with clover fermions」,

The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019)  
(Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).

10. A. L. Lorenz, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, H. Ohno, H. Sandmeyer and H.-T. Shu 「Thermal modifications of quarkonia and heavy quark diffusion from a comparison of continuum-extrapolated lattice results to perturbative QCD」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
11. Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda 「Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
12. Shinji Ejiri, Atsushi Kiyohara, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Mizuki Shirogane, Ryo Iwami, Shota Itagaki, Takashi Umeda, and Yusuke Taniguchi 「Determination of the endpoint of the first order deconfinement phase transition in the heavy quark region of QCD」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
13. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda 「Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
14. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takashi Umeda 「Non-perturbative renormalization of Kaon B parameter using gradient flow」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
15. Masanori Hanada, Goro Ishiki, Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019) (Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019).
16. Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, 「Tensor network study of two dimensional complex  $\phi^4$  theory at finite density」 (招待講演), The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).

17. Goro Ishiki, 「Partial Deconfinement」 (招待講演),  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).
18. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」,  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).
19. K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda 「Thermodynamic properties of QGP at the physical point with the gradient flow method」,  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).
20. A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda 「Measuring chiral susceptibility using gradient flow」,  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).
21. Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, M. Shirogane, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, and A. Baba 「QCD energy-momentum tensor using gradient flow」,  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019).
22. Yoshinobu Kuramashi, 「Tensor renormalization group approach to scalar field theories in particle physics」 (招待講演),  
Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (CAQMP 2019), (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, July 22, 2019).
23. Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Takumi Yamashita, and Yusuke Yoshimura, 「Phase transition of four-dimensional Ising model with higher-order tensor renormalization group」,  
Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (CAQMP 2019), (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, July 22, 2019).
24. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement」,  
Strings and Fields 2019 (YITP, August 19-23, 2019.)
25. H. Ohno 「Phase structure of lattice QCD at finite temperature/In-medium properties of quarkonia and heavy quark transport from lattice QCD」 (招待



- 講演),  
ISTC-CERN-JINR Summer School on High Energy Physics and Accelerator Physics 2019 (al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, August 25-31, 2019).
26. Takeshi Yamazaki 「Nucleon form factors from PACS10 configuration」(招待講演),  
Lattice QCD workshop (La Posada de Santa Fe, USA, August 26-30, 2019).
  27. Goro Ishiki, 「Black holes and holography」(招待講演),  
CCS International Symposium 2019, "11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences," (EPOCHAL, Tsukuba, Japan, Oct. 15, 2019).
  28. K. Kanaya, Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, S. Itagaki, M. Kitazawa, T. Shimojo, A. Suzuki, H. Suzuki, and T. Umeda 「(2+1)-flavor QCD thermodynamics using the gradient flow」,  
CCS International Symposium 2019, "11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences," (EPOCHAL, Tsukuba, Japan, Oct. 15, 2019).
  29. Takeshi Yamazaki 「Nucleon couplings in  $N_f = 2 + 1$  lattice QCD」(招待講演),  
KEK workshop on Nucleon electric dipole moments and spin structure in 2020 (KEK Tokai Campus, Ibaraki, January 11, 2020).

[国内学会、研究会]

1. 谷口 裕介, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士 「物理的なクォーク質量におけるエネルギー運動量テンソルの研究」,  
学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第 11 回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 品川区, 東京, 2019 年 7 月 11 日-12 日).
2. 渡辺展正, 「Partial Deconfinement」,  
基研研究会 素粒子物理学の進展 2019 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2019 年 7 月 29 日-8 月 2 日)
3. 渡辺展正, 「Partial Deconfinement」,  
原子核三者若手 夏の学校 2019 (白浜荘, 滋賀県, 2019 年 8 月 5 日-10 日)
4. 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による 4 次元 Ising 模型の相転移の解析」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019 年 9 月 2 日-4 日).

5. 谷口 裕介, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士 「QGP 粘性係数導出に向けた  $N_f = 2 + 1$  QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究 (II) 」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019年9月2日-4日).
6. 白銀 瑞樹, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「高次補正項を取り入れたグラディエントフローによる一次相転移点近傍の熱力学量」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019年9月2日-4日).
7. 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, 鈴木 遊, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019年9月2日-4日).
8. 金谷 和至, 馬場 惇, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「QGP at the physical point with the gradient flow」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019年9月2日-4日).
9. 渡辺展正, 「部分的非閉じ込め相とその応用」,  
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(TFQT 2019) (京都大学基礎物理学研究所, 京都府, 京都, 2019年9月2日-4日).
10. 伊敷吾郎, 「Berezin-Toeplitz 量子化と diffeomorphism」,  
離散的手法による場と時空のダイナミクス 2019 (島根大学松江キャンパス・マリパーク多古鼻, 2019年9月9日-12日)
11. 藏増嘉伸, 加堂大輔, 坂井涼, 中村宜文, 武田真滋, 吉村友佑 「テンソル繰り込み群による 2次元有限密度複素  $\phi^4$  理論の解析」,  
日本物理学会 2019年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019年9月17日-20日).
12. 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による 4次元 Ising 模型の相転移解析」,  
日本物理学会 2019年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019年9月17日-20日).
13. 山崎 剛, 滑川 裕介 「相互作用境界の Bethe-Salpeter 波動関数を使った二体パイ中間子散乱振幅」,  
日本物理学会 2019年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019年9月17日-20日).
14. 金谷 和至, 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 II」,  
日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019 年 9 月 17 日-20 日).
15. 谷口 裕介, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 馬場 惇 「gradient flow を用いた K 中間子 B パラメータの非摂動的な繰り込み」,  
日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019 年 9 月 17 日-20 日).
  16. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での Gradient flow を用いた PCAC mass の計算」,  
日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019 年 9 月 17 日-20 日).
  17. 浅野侑磨, 伊敷吾郎, 松本高興, 渡辺展正, 「BMN 行列模型と NS5 プレーン 極限」,  
日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019 年 9 月 17 日-20 日).
  18. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 齊藤海秀, 松本高興 「磁場の入ったファジートーラスの 幾何学」,  
日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形, 2019 年 9 月 17 日-20 日).
  19. 秋山 進一郎, 藏増 嘉伸, 吉村 友佑, 山下 巧 「テンソル繰り込み群による 4 次 元 Ising 模型の解析」,  
日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 名古屋, 2020 年 3 月 16-19 日).
  20. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕 介 「Wilson fermion の下での gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,  
日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 名古屋, 2020 年 3 月 16-19 日).
  21. 金谷 和至, 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基づく SFtX 法による格子 2+1 フレーバー QCD の熱力学 – 2-loop 係数の効果」,  
日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 名古屋, 2020 年 3 月 16-19 日).
  22. Georg Bergner, Norbert Bodendorfer, Masanori Hanada, Enrico Rinaldi, Hi- romasa Watanabe, 「Partial deconfinement and gauge fixing」,  
日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 名古屋, 2020 年 3 月 16-19 日).
  23. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 齊藤海秀, 松本高興 「磁場のあるトーラスの行列正則化」,  
日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 名古屋, 2020 年 3 月 16-19 日).

## 受賞

1. 足立宏幸 筑波大学数理物質科学研究科研究科長賞 (2019 年度修士論文)

## 国際会議・研究会の実施

1. XQCD2019 組織委員会（江尻信司, 大野浩史（委員長）, 金谷和至, 北沢正清, 藏増嘉伸, 谷口裕介, 松古栄夫）主催,  
筑波大学計算科学研究センター・筑波大学宇宙史研究センター・高エネルギー  
加速器研究機構共催,  
The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD  
2019),  
2019年6月24-26日, 筑波大学東京キャンパス, 東京,  
参加国数:13, 参加者数:89.

#### 国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動

1. 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/>
3. International Lattice Data Grid (ILDG)  
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
4. Japan Lattice Data Grid (JLDG)  
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
5. 石橋延幸、日本物理学会誌編集委員長
6. 石橋延幸、日本物理学会理事
7. 石橋延幸、PTEP 編集委員