

jh190048-NAH

## カイラルフェルミオンを用いた格子 QCD による中間子質量生成機構の研究

関口 宗男 (国士舘大学)

**概要** 強い相互作用の第 1 原理である量子色力学 (QCD) を用いて、カイラル相転移付近での中間子の構造及び質量の変化を研究することにより、物質の質量の起源を明らかにすることを目的としている。昨年度完成した格子カイラル対称性をもつ Truncated overlap フェルミオン (TOF) 作用コードを用いて今年度はカイラル相転移に関する  $a_1$  中間子の基底状態と第 1 励起状態の構造と質量を明らかにすることができた。また、TOF 作用を用いて有限温度におけるカイラル・パートナーに属する中間子の温度依存性を調べるシミュレーションを実施して、臨界温度を超えると、これらの中間子の質量が縮退することが分かった。さらに TOF 作用コードのカイラル対称性に関する性質の詳細を調べるシミュレーションを実施した。また、現実的なクォーク質量領域での計算を実施するための高速コード開発に着手した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

大阪大学

#### (2) 共同研究分野

##### ■ 超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

- ・ 関口宗男 (国士舘大学) 代表  
研究統括・理論的考察・データの分析
- ・ 若山将征 (大阪大学) 副代表  
コード開発・演算の実行・データ解析
- ・ 伊達 進 (大阪大学サイバーメディアセンター)  
アルゴリズム・コード開発
- ・ 中村純 (大阪大学)  
アルゴリズム・コード開発
- ・ 村上祐子 (国士舘大学)  
アルゴリズム・コード開発
- ・ 和田浩明 (国士舘大学)  
コード開発・演算の実行

### 2. 研究の目的と意義

本研究は、強い相互作用の第一原理である量子色力学 (QCD) を非摂動的に計算でき

る格子 QCD を用いて、カイラル相転移付近での中間子の質量生成機構を明らかにすることにより、物質の質量の起源を探ることを目的としている。カイラル相転移とは、QCD の持つカイラル対称性が自発的に破れ、QCD 真空が相転移を起こす現象である。この現象はビッグバン直後の超高温状態から現在の宇宙が生成されたときに起きたと考えられている。有限温度では、カイラル対称性の破れが部分的に回復し、臨界温度で相転移が起こることが期待されている。QCD 有効理論によれば臨界温度以上ではカイラル対称性において対をなす中間子 (カイラル・パートナー:  $\pi$  中間子と  $\sigma$  中間子及び  $\rho$  中間子と  $a_1$  中間子) の質量は縮退すると予想されている。第 1 原理に基づく有限温度のシミュレーションにより QCD 真空の相転移付近でのカイラル・パートナーの質量変化を調べることはカイラル相転移を理解する上で重要な課題である。これによりカイラル対称性の力学的破れが物質の質量のほぼすべてを生成していることを実証する。質量の起源に関する根本的な理解を深める点が本研究の最大の特色であり、宇宙の創生の過程を明らかにするために欠くことのできない研究課題である。実

験的には CERN における高輝度 LHC 実験や米国 BNL における RHIC 実験により検証される可能性がある。最終目標を達成するためには、現在のスーパーコンピュータの能力を超えるテーマであるが、可能な限り理想に近い研究成果を上げることが目標とする。スーパーコンピュータを最大限に活用するコード開発が研究の成否を分けることになり計算機科学分野と計算科学分野の双方の研究基盤の発展に資すると考える。今年度は次の4つのテーマの研究を進めることを計画した。

- (1) 第1原理計算による  $a_1$  中間子励起状態の質量の確定
- (2) 第1原理計算による有限温度における中間子質量変化のシミュレーション
- (3) シミュレーションコードの高速化
- (4) TOF 作用の高速計算の準備 (JHPCN の計算機リソースを使用する)

### 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究ではクォークやグルーオンを数値計算するためにクォークやグルーオンを離散化した時空間で定義している。もっとも普及している方法としてはクォークをウィルソン・フェルミオン (WF) 作用を使って記述する手法がある。WF 作用の計算は今までの蓄積があり信頼性の高い手法であるが、クォークのもつ対称性のうち質量の起源に関係しているカイラル対称性を持っていないという欠点がある。本研究はカイラル対称性の自発的な破れに関係しているため、この対称性を取り扱えるコードの作成を目標とし前年度に格子上でカイラル対称性をもつ Truncated overlap フェルミオン (TOF) 作用によるコードを開発した。この作用の欠点は多大な計算機資源を要することである。この作用を使った中間子相関関数 (伝搬関数) の計算では、大規模線形方程式を解く部分が最も時間がかかる。時空間の格子サイズを  $16 \times 16 \times 16 \times 16$  とすると、WF 作用の場合、 $(3 \times 4 \times 16 \times 16 \times 16 \times 16)$  次の正方行列に対する線形方程式を解く必要がある。TOF 作用は WF 作用を構成要素に 5 次元方

向に拡張した形をしており、さらに逆行列が入れ子構造になっている。そのため、5 次元方向の格子サイズを  $N_5$  とすると、 $(3 \times 4 \times 16 \times 16 \times 16 \times 16 \times N_5)$  次の正方行列に対する線形方程式を解いた後に、さらにもう一度、同じサイズの方程式を解く必要がある。今回の計算では、 $N_5=32$  としたので、およそ 2500 万次の正方行列となる。このため、TOF 作用が提唱された後も、実際の数値計算の手法としては普及していなかった。TOF 作用のコードはベクトル化に向いているため SX-ACE でのコード開発及びシミュレーションの実行が適していると判断している。また、参加研究者は大阪大学の SX-ACE (SX-8 及び SX-9 等も含む) でのコードの開発及びシミュレーションの経験を有する。また、大阪大学サイバーメディアセンターの伊達准教授にアルゴリズム・コード開発担当として共同研究に参加していただいている。この共同研究体制を確立したことにより理想的な研究環境が得られたという点で意義があると考えられる。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

我々の研究目的を実現するためには、第1には、格子カイラル対称性を持つフェルミオン (カイラルフェルミオン) 作用のコードの作成、第2としては、軽いクォーク質量を計算できるように改良することである。前年度は、カイラルフェルミオン作用については、TOF 作用のコードを開発し、テスト計算を開始した。テスト計算として、我々の最終的な研究に関連するテーマとしてカイラル・パートナーのなかで真空での状態が理論的にも実験的に確定していない  $a_1$  中間子の質量のシミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、時間の格子サイズを 24、空間の格子サイズを  $8 \times 8 \times 8$  とした。カイラル対称性を近似的に実現するための 5 次元目の格子サイズを  $N_5=32$  とし、5 次元の質量を  $m_5=1.65$  とし

た。ゲージ結合定数を指定する  $\beta$  を 5.7 とした。 $a_1$  中間子は u クォークと d クォークから構成される 2 体のオペレーターで記述した。3 種類のクォーク質量  $m_f$  と 3 種の値でシミュレーションを実施した。格子サイズは  $a=0.190(2)$  fm、クォーク質量は、 $m_f a=0.08$ 、 $0.06$ 、 $0.04$  とした。クォーク質量それぞれにつきゲージ配位数は、それぞれ 3000、3000、7864 を使用した(表 1)。このシミュレーションはオペレーターを 2 体に限り、かつクエンチ近似であることから、 $a_1$  中間子が u クォークと d クォークの 2 体から構成されるときに実験を再現できるかを検討することが可能である。クォーク質量としてはやや重いため粗い近似とも言えるが、 $a_1$  中間子が  $\pi$  及び  $\rho$  中間子に崩壊するチャンネルが開く直前までの領域で高精度のシミュレーションすることを目指した。このチャンネルにはクォーク模型で説明できるよりも多くの状態が実験により確認されている。少なくとも  $a_1(1260)$ 、 $a_1(1420)$ 、 $a_1(1640)$  の状態が実験的に存在している。これらが如何なる状態かを確定することはハドロン分光学の重要な課題である。有限温度の物理を考える上でも  $a_1$  中間子として、どのようなオペレーターが適当なのかを決定するためにゼロ温度での  $a_1$  中間子の構成を明確にすることは意味がある。昨年度の結果は先行研究でははっきりしていなかった  $a_1$  中間子の基底状態が  $a_1(1260)$  であることを確定できた(表 2)。

表 1 各クォーク質量 ( $m_f a$ ) におけるゲージ配位数と  $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の質量比 ( $m_\pi / m_\rho$ )。

$m_f a$	0.08	0.06	0.04
$m_\pi a$	0.6668(7)	0.5895(8)	0.5028(6)
$m_\rho a$	0.9496(18)	0.9042(24)	0.8614(24)
$m_\pi / m_\rho$	0.7028(2)	0.652(3)	0.584(2)
Confs.	3000	3000	7864

表 2  $a_1$  中間子の質量

	Our result	実験値[1]
質量	1272(45)MeV	1230(40)MeV

これらのテストシミュレーションの結果第 1 励起状態も確定できる可能性があるので今年度も継続してシミュレーション実施している。

本研究は最終的には有限温度でのカイラル・パートナーの質量の変化をシミュレーションすることが目標であるが、前年度は TOF 作用を用いた有限温度のシミュレーションを実施した。これは最終的な目標である物質の質量の起源と解き明かすためへの準備的なシミュレーションである。軽いクォークで計算できるコードは完成できていないため有限温度の計算は現実のクォーク質量よりも重いクォークによるテスト計算となった。そのため  $\pi$  中間子も現実的な質量よりも重い計算になっている。今回のシミュレーションでは、クエンチ近似を使用しているが、最終的にはクォークのループを含む動的クォークによるシミュレーション(ダイナミカル・クォークによるフル QCD のシミュレーション)を実施する計画である。 $\sigma$  中間子はフル QCD でないと正しく計算することができないクォーク・ラインが繋がらないファインマン・グラフ(非結合グラフ)が存在する。今回のシミュレーションではクォーク・ラインが繋がったグラフのみを取り上げている。この  $\sigma$  中間子をバレンス  $\sigma$  中間子と呼んでいる。前年度では有限温度の中間子質量をシミュレーションするためのパラメーターを検討するシミュレーションを終了し、必要なパラメーターの設定を終えて JHPCN の計算機リソースと大阪大学核物理研究センターの計算機リソースを使用して有限温度の中間子のシミュレーションを実施した。SX-ACE での計算は前年度 3 月で終了したがデータの解析は今年度で実施した。シミュレーションの具体的内容は今年度の成果の詳細で報告する。

[1] M. Tanabashi et al. (Particle Data

Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018).

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 第1原理計算による  $a_1$  中間子励起状態の質量の確定 (JHPCN の計算機リソースを使用する)

前年度に引き続き格子上でカイラル対称性を持つ TOF 作用を用いたシミュレーションコードを使って真空中での  $a_1$  中間子の第1励起状態のシミュレーションを行った。第1励起状態を確定するために新たに2種類のクォーク質量  $mfa=0.05, 0.07$  についてシミュレーションを実施した。クォーク質量それぞれにつきゲージ配位数は、それぞれ 3000、3000、7864 を使用した(表 3)。

表 3 各クォーク質量 ( $mfa$ ) におけるゲージ配位数と  $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の質量比 ( $m_\pi/m_\rho$ )。

$mfa$	0.07	0.05
$m_\pi a$	0.6283(7)	0.5478(8)
$m_\rho a$	0.9249(21)	0.8816(27)
$m_\pi/m_\rho$	0.679(2)	0.621(3)
Confs.	3000	3600

シミュレーションはすべて SX-ACE で実施している。前年度と今年度のシミュレーションの結果から得られた最終的な  $a_1$  中間子と基底状態と第1励起状態の結果である(表 4)。図 1 に各中間子伝搬関数の時間変化、図 2 に各中間子の質量の  $\pi$  中間子の質量2乗に対する依存性を示す。

これによりカイラル・パートナー  $\rho$  中間子と対を成す中間子  $a_1$  中間子は実験的に  $a_1(1260)$  (質量  $1230 \pm 40 \text{MeV}$ ) と考えて良いことが分かった。また  $a_1(1640)$  は第1励起状態であると考えられる。

先行研究では  $a_1$  中間子の第1励起状態に関しては確定値を得られたものはない。今回の

シミュレーションによって基底状態と第1励起状態の実験値を強い相互作用の第1原理である QCD により再現することができた。

さらに、 $a_1(1420)$  (質量  $1411 \pm 4 \text{MeV}$ ) は格子 QCD とクォーク模型の両方の立場からクォーク・反クォークの2体と考えることは難しいと考えられる。格子 QCD により  $a_1$  中間子の第1励起状態を実験と比較できる結果を与えたはじめてのシミュレーションである。

表 4  $a_1$  中間子の質量

	Our result	実験値[1]
基底状態	1158(42)MeV	1230(40)MeV
第1励起状態	1667(22)MeV	1655(16)MeV

結果は国際会議 Hadron2019 で発表し、査読付きプロシーディングスとして掲載が決定した。

カイラル・パートナーに属する中間子の性質には TOF 作用の採用は有効であることが検証できたと考えられる。この研究に今年度配分された研究資源の 63.5% を使用した。

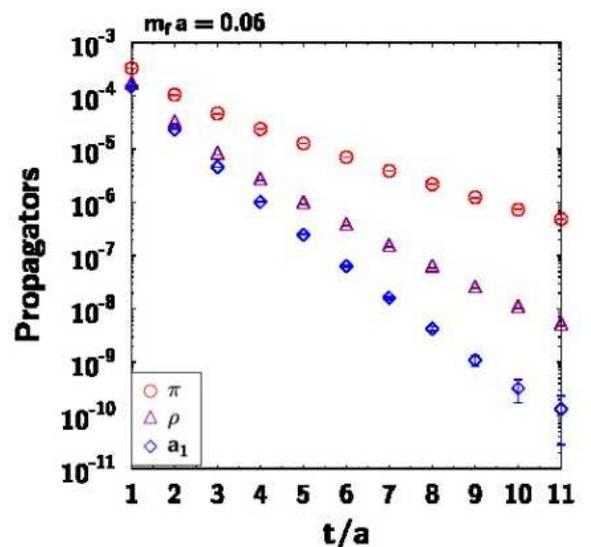


図 1  $\pi, \rho, a_1$  中間子伝搬関数の時間依存性

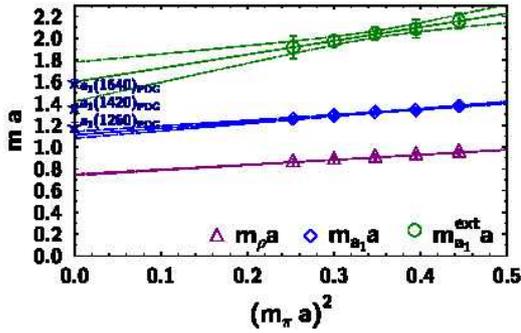


図2  $\rho$  中間子、基底状態  $a_1$  中間子、第1励起状態  $a_1$  中間子の質量の  $\pi$  中間子質量2乗依存性.  $(m_\pi a)^2=0$  が真空の各中間子の質量の値で実験値と比較できる。

(2) 第1原理計算による有限温度における中間子の質量変化のシミュレーション (JHPCN の計算機リソースを使用する)

この研究は今年度の JHPCN の共同研究申し込み後に大阪大学核物理研究センター (RCNP) との共同研究として計算機リソースの提供を受けて大阪大学サイバーメディアセンターの SX-ACE でのシミュレーションを前年度3月末に終了した。今年度前半でデータの解析を実施した。

本研究課題は将来的な有限温度の計算量を見積もるとともに現状のコードでどこまで物理的な内容に迫れるかが目的である。

シミュレーションは2段階で行っていて、第1段階して、TOF 作用を使って真空での  $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の伝搬関数を計算する。カイラル対称性を近似的に実現するための5次元目の格子サイズを  $N_5=32$  とし、5次元の質量を  $m_5=1.65$ 、空間のサイズを  $N_s$ 、時間のサイズを格子サイズ  $N_t$  として、 $N_s \times N_t \times N_5=16^3 \times 16 \times 32$  の格子でのシミュレーションを実施した。この格子空間上で8つのゲージ結合定数を指定するパラメーター  $\beta$  に対して複数のクォーク質量  $mfa$  に関してシミュレーションを行った。 $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の伝搬関数を求めて、 $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の質量比 ( $m_\pi/m_\rho$ )

$\rho$ ) を求めた結果が図3である。このシミュレーションから  $m_\pi/m_\rho=0.8$  になるクォーク質量を読み取った結果 (0.8 に一番近いクォーク質量) が表5である。このシミュレーションではゲージ場に関しては岩崎ゲージ作用によるクエンチ近似を用いて、ゲージ配位については12~80個生成し使用している。

表5  $m_\pi/m_\rho=0.8$  でのクォーク質量

$\beta$	a [fm]	mfa
2.187	0.2079(15)	0.177
2.214	0.1977(13)	0.175
2.247	0.1853(09)	0.160
2.281	0.1727(10)	0.150
2.334	0.1577(09)	0.145
2.416	0.1359(07)	0.133
2.487	0.1206(09)	0.113

これら8つのクォーク質量を使って有限温度のシミュレーションを実施した。この  $\beta$  及びクォーク質量に対応する温度  $T$  と臨界温度  $T_c$  との比は、本来はシミュレーションをして求めるべきあるが今回は先行研究[2, 3]のデータを使用した。このパラメーターの設定でクエンチ近似を用いてゲージ場を生成した。各クォーク質量に対する  $T/T_c$  とゲージ配位数を表6に示す。

表6 有限温度のシミュレーションパラメーター

$\beta$	$T/T_c$	a [fm]	mfa	Confs.
2.187	0.86	0.2079(15)	0.177	2400
2.214	0.91	0.1977(13)	0.175	2000
2.247	0.97	0.1853(09)	0.160	2000
2.281	1.04	0.1727(10)	0.150	2000
2.334	1.14	0.1577(09)	0.145	2000
2.416	1.32	0.1359(07)	0.133	2000
2.487	1.59	0.1206(09)	0.113	2000

- [2] M. Okamoto et al. (CP-PACS Collaboration), Phys. Rev. D60, 094510, 1999
- [3] A.A. Khan et al. (CP-PACS Collaboration), Nucl. Phys. B ( Proc. Suppl. ), 83, 176, 2000

第 2 段階として、このゲージ配位を用いて有限温度におけるカイラル・パートナーに属する 4 つの中間子質量を各温度でシミュレーションをして、カイラル・パートナーに属する 4 つの中間子 ( $\pi$  中間子、 $\rho$  中間子、スカラー中間子 (バレンス  $\sigma$  中間子)、 $a_1$  中間子) 質量と真空の  $\rho$  中間子質量の比の  $T/T_c$  依存性を明らかにした (図 4)。これらの中間子はすべて  $u(d)$  クォーク及びその反クォークの 2 体のオペレーターで構成している。スカラー中間子 (バレンス  $\sigma$  中間子) に関しては、4 で記述したように  $\sigma$  中間子の構成するファイマンダイアグラムの一部を計算したものである。 $\pi$  中間子、バレンス  $\sigma$  中間子及び  $\rho$  中間子、 $a_1$  中間子質量は臨界温度付近から同じ質量に縮退しはじめ徐々に重くなることが分かった。また、温度の低い領域で  $a_1$  中間子はシグナルがかなり不明瞭な結果であったが (低温部分のデータは図 4 にプロットしていない)、クォーク模型で励起状態になる中間子 ( $\sigma$  中間子、 $a_1$  中間子等) は角運動量を持つため格子 QCD のように空間を離散化した場合にはシグナルが不明瞭になる傾向にある。今回はテスト計算であり、計算機リソースの有効活用の立場からシミュレーションを継続することは不適當であると判断し、シミュレーションはここまでとした。カイラル・パートナーの中間子の質量が臨界温度付近から変化し縮退をはじめることが分かった点と有限温度での計算量を見積もるという点で成果があったと考える。

これらの結果は国際会議 Lattice2019 で発表し、査読付き国際会議プロシーディングス

として Proceedings of Science 誌に掲載された。

計画を変更した分の JHPCN の計算機リソースを利用した研究に関しては (4) として報告する。

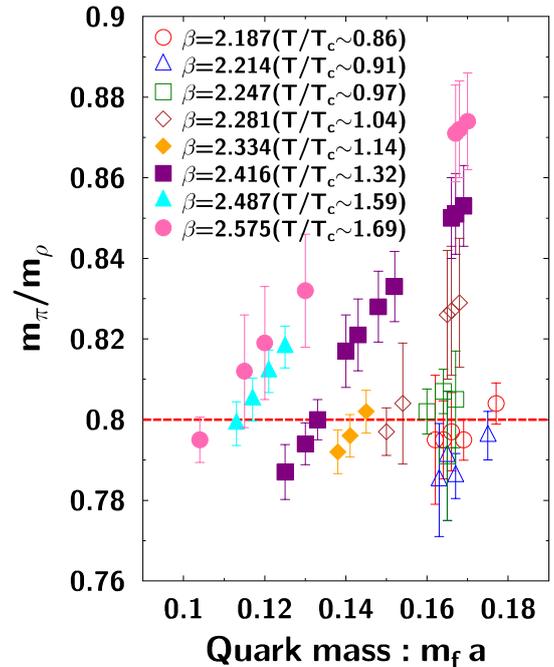


図 3  $\pi$  中間子と  $\rho$  中間子の質量比 ( $m_\pi/m_\rho$ ) のクォーク質量依存性

$m_\pi/m_\rho=0.8$  に一番近いクォーク質量を有限温度のパラメーターとして採用する。エラーバーの範囲内で  $m_\pi/m_\rho=0.8$  を満たしている。

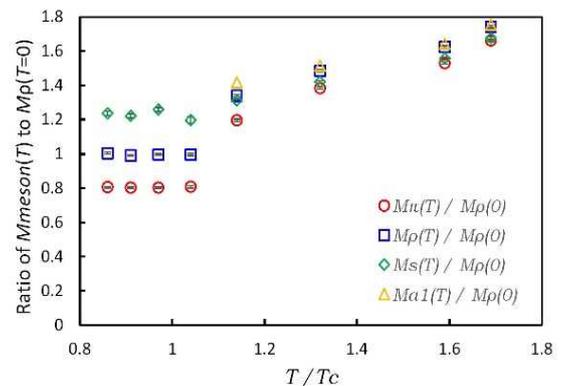


図 4 有限温度における  $\pi$  中間子質量、

$\rho$  中間子質量、スカラー中間子(バレンス  $\sigma$  中間子)、 $a_1$  中間子質量と真空の  $\rho$  中間子質量との比の  $T/T_c$  依存性

### (3) シミュレーションコードの高速化 (JHPCN の計算機リソースを使用しない)

最終目標を達成するためにも計算資源の有効活用のためにも正方行列に対す線形方程式を高速で解法する必要があり、前処理付き共役勾配法によるコード開発を行っている。前処理法として Hasenbusch-Jansen によって提案されている前処理法[4]を採用し、かつ独自の改良を行いながらコードを作成している。この報告書提出の段階でコードは完成できていない。あと1か月程度で完成できると考えている。

### (4) TOF 作用の高速計算の準備 (JHPCN の計算機リソースを使用する)

計画を変更し、配分されている SX-ACE の残りの研究資源(資源の 36.5%相当)を使って、TOF 作用のテスト計算を実施した。TOF 作用はカイラル対称性のために5次元方向の自由度が増えている。5次元方向を小さくできれば計算量を減らすことができる。ただし、カイラル対称性は、この5次元方向の自由度と関係しているため、5次元方向を小さくするとカイラル対称性に影響がでる。そのため5次元方向( $N_5$ の依存性)の依存性を検討することが有益であると判断した。TOF 作用は大阪大学サーバーメディアセンターの協力でコードの高速化をしているが、高速化後に  $N_5$  の依存性は検証していない。前処理付き共役勾配法の開発が遅れているため中間報告からさらに計画の変更を行った。3月末までに与えられた計算機リソースの残りすべてを使いシミュレーションを実施した。結果の解析は現段階で終了していない。

[4] M. Hasenbusch and K. Jansen, Nucl. Phys. B 659, 299 (2003)

[hep-lat/0211042].

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度計画した研究は、計画変更をしたが実質的に計画の80%を完了できたと考えている。Hasenbusch-Jansen による前処理法付き共役勾配法を取り入れたコードの完成が残っているが、次年度の早期にコードを完成させる。前処理法付き共役勾配法に実装した WF 作用コードを SX-ACE へ移植することに取り組む。2020 年度前半に実装し、テスト計算を開始する予定で研究を進めている。次にコード開発としては、Hasenbusch-Jansen による前処理法付き共役勾配法を TOF コードに実装することに着手する予定である。この2つのコードの完成で軽いクォークを用いてより現実的な物理領域でのシミュレーションが可能になる。

我々の開発してきたコードに Hasenbusch-Jansen による前処理法付き共役勾配法を実装するだけでは最終的な研究目標を達成するためには不十分であるため、コードの並列化に取り組むことが次の課題である。さらに GPU マシンへの実装も視野に入れてコード開発を検討している。これらの点に関しては大阪大学サイバーメディアセンターとの共同研究をさらに深化させる必要がある。

完成できたコードをそれぞれ質量が違うクォークと反クォーク(現在のプログラムは質量が同じ場合だけが計算可能)を同時に計算できるコードに書き換えることを計画している。これにより  $s$  クォークを含めてカイラル9重項に関する中間子のシミュレーションが可能になる。カイラル9重項中間子の物理も物質の質量の起源であるカイラル対称性の破れに関係しているため重要な研究課題である。

## 7. 研究業績一覧(発表予定も含む)

- (1) 学術論文 (査読あり)  
なし
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
1. Y. Murakami, A. Nakamura,  
M. Sekiguchi, H. Wada,  
M. Wakayama, “Lattice study of  
meson properties at fine  
temperature using the truncated  
overlap fermions ”, Proceedings  
of Science (Lattice2019)  
045, pp. 7 (2020 年 1 月).
  2. 1. M. Wakayama, Y. Murakami,  
A. Nakamura, M. Sekiguchi, H. Wada,  
“Spectroscopy of  $a_1$  mesons from  
lattice QCD with the truncated  
overlap fermions” ,  
International Journal of Modern  
Physics A, pp. 5 (to be  
published.).
- (3) 2. 国際会議発表 (査読なし)
1. H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura,  
M. Sekiguchi, M. Wakayama, “Lattice  
study of meson properties at fine  
temperature using the truncated  
overlap fermions ”, The 37th  
international conference on lattice  
field theory (Lattice2019) (2019 年 6  
月).
  2. M. Wakayama, Y. Murakami, A.  
Nakamura, M. Sekiguchi, H. Wada,  
“ Spectroscopy of  $a_1$  mesons from  
lattice QCD with the truncated overlap  
fermions ”, The 18th International  
Conference on Hadron Spectroscopy and  
Structure (HADRON2019) (2019 年 8 月).
- (4) 国内会議発表 (査読なし)  
なし
- (5) その他(特許, プレスリリース, 著書等)  
なし