

研究責任者名 Name	伊藤 悦子 Itou Etsuko	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-20 大型 13/14-20-2	研究課題名 Program title	四次元非可換ゲージ理論における相互作用する共形場の理論の探究

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

#### 成果の概要

##### Abstract

(和文)

今期の我々は、これまでに発見した四次元  $SU(3)N_f=12$  理論の赤外固定点における、共形場の理論の性質を明らかにすることを目標とし研究を行った。そのために複合演算子に対するくりこみ因子を求める step scaling 法と、Dirac 演算子の固有モード数に対するハイパースケーリング則という独立した 2 種類の方法を用いて、赤外固定点における質量の異常次元を求めた。

その結果、質量の異常次元はとて小さいことがわかった。

さらに、近年、 $SU(3)$  ゲージ理論において非自明な相互作用を持つ赤外固定点を持つ最小のフレーバー数は  $N_f=8$  から 10 の間であるとわかってきた。そこで世界に先駆け  $N_f=9$  理論の赤外固定点の探索を開始した。

また、スケール不変性の破れを表す「ディラトンモード」の測定を行う準備として、Wilson flow を用いた quenched QCD 理論を用いたエネルギー運動量テンソルの測定も行った。

(英文)

We obtain the mass anomalous dimension at infrared fixed point of the  $SU(3) N_f=12$  theory.

To obtain it, we use two independent methods, namely the step scaling method and hyperscaling for the Dirac eigenmodes.

Our preliminary result is smaller than the two or four loop perturbative analysis.

Furthermore, recent studies reveal that there is the lower bound of the conformal window, where there is a nontrivial infrared fixed point of the theory, is around  $8 < N_f < 10$ .

We start the numerical study for the searching the infrared fixed point of the  $N_f=9$  theory.

In addition, we measure the energy-momentum tensor on the lattice for the quenched QCD theory.

It is a test for measurement of "dilaton mode", which indicates the spontaneous scaling invariance breaking.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	4	1	3	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program									
1. 第 69 回 日本物理学会年次大会 東海大学で、口頭発表（2014/03/28） 「gradient flow を用いた SU(3) ゲージ理論の熱力学量の測定」									
2. 第 69 回 日本物理学会年次大会 東海大学で、企画講演（2014/03/29） 「格子ゲージ理論による新物理模型の非摂動論的研究」									
3. Lattice 2014 @ Columbia University, USA でポスター発表(2014/6/24) 「Determination of the mass anomalous dimension for $N_f = 12$ and $N_f = 9$ SU(3) gauge theories」									
4. 日本物理学会 2014 年秋季大会(佐賀大学) で口頭発表 2014/9/21 「SU(3) ゲージ理論におけるコンフォーマル・ウィンドウの非摂動論的決定」									
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)									
1	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Etsuko Itou, Masakiyo Kitazawa and Hiroshi Suzuki (FlowQCD Collaboration)</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Thermodynamics of SU(3) Gauge Theory from Gradient Flow</td> </tr> <tr> <td>雑誌名 name of journal</td> <td>Phys. Rev. D 90, 011501 (2014)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td><a href="http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501">http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501</a></td> </tr> </table>	著者名 Author	Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Etsuko Itou, Masakiyo Kitazawa and Hiroshi Suzuki (FlowQCD Collaboration)	タイトル title	Thermodynamics of SU(3) Gauge Theory from Gradient Flow	雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D 90, 011501 (2014)	URL	<a href="http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501">http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501</a>
著者名 Author	Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Etsuko Itou, Masakiyo Kitazawa and Hiroshi Suzuki (FlowQCD Collaboration)								
タイトル title	Thermodynamics of SU(3) Gauge Theory from Gradient Flow								
雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D 90, 011501 (2014)								
URL	<a href="http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501">http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.011501</a>								
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)									
1.	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>Etsuko Itou and Akio Tomiya</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Determination of the mass anomalous dimension for <math>N_f=12</math> and <math>N_f=9</math> SU(3) gauge theories</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等 name of journal</td> <td>arXiv:1411.1155[hep-lat]</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td><a href="http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155">http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155</a></td> </tr> </table>	著者名 Author	Etsuko Itou and Akio Tomiya	タイトル title	Determination of the mass anomalous dimension for $N_f=12$ and $N_f=9$ SU(3) gauge theories	雑誌名等 name of journal	arXiv:1411.1155[hep-lat]	URL	<a href="http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155">http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155</a>
著者名 Author	Etsuko Itou and Akio Tomiya								
タイトル title	Determination of the mass anomalous dimension for $N_f=12$ and $N_f=9$ SU(3) gauge theories								
雑誌名等 name of journal	arXiv:1411.1155[hep-lat]								
URL	<a href="http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155">http://arxiv.org/abs/arXiv:1411.1155</a>								
2.	<table border="1"> <tr> <td>著者名</td> <td>Etsuko Itou</td> </tr> <tr> <td>タイトル</td> <td>The twisted Polyakov loop coupling and the search for an IR fixed point</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等</td> <td>PoS LATTICE2013 (2014) 005</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td><a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf</a></td> </tr> </table>	著者名	Etsuko Itou	タイトル	The twisted Polyakov loop coupling and the search for an IR fixed point	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 005	URL	<a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf</a>
著者名	Etsuko Itou								
タイトル	The twisted Polyakov loop coupling and the search for an IR fixed point								
雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 005								
URL	<a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/005/LATTICE%202013_005.pdf</a>								
3.	<table border="1"> <tr> <td>著者名</td> <td>Etsuko Itou</td> </tr> <tr> <td>タイトル</td> <td>The anomalous dimension at the infrared fixed point of <math>N_f = 12</math> SU(3) theory</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等</td> <td>PoS LATTICE2013 (2014) 481</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td><a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf</a></td> </tr> </table>	著者名	Etsuko Itou	タイトル	The anomalous dimension at the infrared fixed point of $N_f = 12$ SU(3) theory	雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 481	URL	<a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf</a>
著者名	Etsuko Itou								
タイトル	The anomalous dimension at the infrared fixed point of $N_f = 12$ SU(3) theory								
雑誌名等	PoS LATTICE2013 (2014) 481								
URL	<a href="http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf">http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/481/LATTICE%202013_481.pdf</a>								
その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（著者、タイトル、論文種別、URL を記載） Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)									
1. Etsuko Itou, A novel scheme for the wave function renormalization of the composite operators, 投稿中, <a href="http://arxiv.org/abs/arXiv:1307.6645">http://arxiv.org/abs/arXiv:1307.6645</a>									
特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）（過去に遡っても構いません。） Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)									

# 実施報告書

- 格子シミュレーションを用いた共形場の理論の研究 -

## 1. 研究組織

研究責任者

伊藤 悦子 (いとう えつこ) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 特任助教

## 2. 当該期間の実施報告の詳細

本研究の目的は、4次元 large flavor 非可換ゲージ理論 ( $SU(N_c)$ ) の強結合領域の理論のふるまいを調べることである。このような理論は、摂動論的解析を行うと、赤外領域に非自明な相互作用を持つ固定点が存在する (Caswell, 1974)。その固定点近傍で大きな異常次元を持つオペレータが存在する場合、それが標準理論の Higgs セクターを与える理論の候補となったり、未知の複合粒子として低エネルギー領域の物理に影響したりする可能性が高く、標準模型を超えるモデルの候補の一つとして注目されている。また、場の理論としても、4次元で非自明な相互作用をもつ固定点の例は、あまり知られておらず、理論的にも興味深い対象である。

この固定点の存在は、ゲージ群と結合するフェルミオン場の表現や数に依存する。摂動論 2 ループの解析から、基本表現のフェルミオンが存在する  $SU(3)$  ゲージ理論の場合は  $8 < N_f \leq 16$  の領域に赤外固定点が存在することが示唆されている。しかし、この固定点での結合定数の値はフレーバー数によっては強結合領域にあり、固定点の存在と固定点近傍での場の理論の摂動論的解析は信頼できないため、非摂動論的な解析が非常に重要である。

このような背景を踏まえ、今年度は以下の研究課題を申請し、実施した。初めに各プロジェクトの実施内容の概要を述べ、次に最も計算時間を割いたプロジェクト A-1, A-2 の実施結果を報告する。

プロジェクト A: [ $SU(3)$   $N_f = 12$  理論の共形場の理論の性質について]

A-1 : step scaling 法による異常次元の測定

A-2 : Dirac 演算子の固有モード数のハイパースケーリングによる異常次元の導出

A-3 : 質量による変形と複合演算子のスペクトルの測定

昨年度までに行ったシミュレーションで、12個の massless fermion の結合した  $SU(3)$  ゲージ理論において、Twisted Polyakov loop (TPL) スキームという有限体積で定義される繰り込んだ結合定数の振舞いを調べ、この理論に繰り込み群の赤外固定点が存在することが分かった [1]。この研究は、それまで赤外固定点の存在について結論が分かれてたこの理論において、様々な系統誤差を見積もり、また格子上の相構造なども同時に調べた論文として評価され、Lattice 国際会議での招待講演に選ばれた [2]。

さらに、この結果を踏まえて、赤外固定点上に実現される共形場理論の性質を調べていた。特に今年度は、固定点近傍での臨界指数の一つである演算子の異常次元を2種類の方法で測定した (プロジェクト A-1, A-2)。これに関しては、以下で詳しく述べるように、予備的な結果を得て、昨年と今年の Lattice 国際会議で発表を行った [3, 4]。現在、本論文としてまとめているところである。

また、フェルミオンに僅かな質量項を加えることで起こるスケール不変性の破れによって現れる「ディラトン・モード」の測定を、最近開発された Wilson flow を用いて模索する計画であった (プロジェクト A-3)。これに関しては、計算機のシミュレーション時間が足りなかったため、実施するの

を中止した。しかしながら、Wilson flow を用いた新しい物理量の導出のための準備として有限温度の quenched QCD についてのシミュレーションを行い、これは論文 [5] として出版した。(システム A q1 クラス、q4 クラスをそれぞれ 100 時間程度使った。) その後、quenched QCD に関する研究は、物理としての興味が異なるため scwftt という別グループとして申請しなおし、発展している。

プロジェクト B: [SU(3)  $N_f = 9$  理論の赤外固定点の探索]

SU(3) ゲージ理論の様々なフレーバー数の理論における赤外固定点の存在に関して、これまでの国内外の研究状況を図 1 にまとめた [6, 2]。上記の 4 つの手法に関して、青がその理論に赤外固定点が存在すると主張している一つの独立なグループを表し、一方で赤はその理論に赤外固定点がないと主張しているグループを表した。この状況から、非自明な赤外固定点のあるフレーバー数の下限は、 $N_f \sim 8$

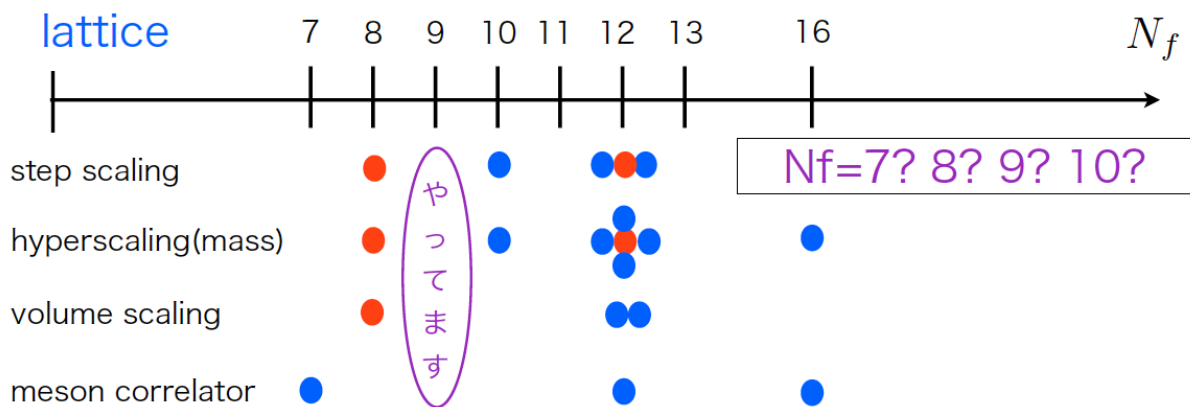


図 1: SU(3) 基本表現のフェルミオン ( $N_f$ ) 理論の最近の研究結果。一つの丸が一つの独立なグループを示す。青がその理論に赤外固定点が存在すると主張しているグループ、赤がその理論に赤外固定点がないと主張しているグループを表す。(第 69 回 日本物理学会年次大会 企画講演「格子ゲージ理論による新物理模型の非摂動論的研究」登壇者：伊藤悦子のスライドより。)

であることがわかってきた。(ただし、 $N_f = 8$  に関しては、未だどのグループもプレリミナリーな結果しか出していない。一方で、Hayakawa *et. al.*[7]、Appelquist *et.al.*[8] らによって、 $N_f = 10$  の場合は赤外固定点が存在する事が、既に本論文として出版されている。) すると、次に疑問なのは、 $N_f = 9$  が赤外固定点を持つか否か、である。

今年度は、 $N_f = 9$  の固定点の探索のためのコードの開発を行い、また、PCAC 質量の測定から繰り込んだフェルミオンの質量を一定とするホッピングパラメータの決定のためのシミュレーションを行った。

次に、期間中の多くのシミュレーション時間を使用した、プロジェクト A-1, A-2 の実施結果と成果の詳細を示す。

プロジェクト A: [SU(3)  $N_f = 12$  理論の共形場の理論の性質について]

昨年度までに行ったシミュレーションで、12 個の massless fermion の結合した SU(3) ゲージ理論

において、Twisted Polyakov loop (TPL) スキームという有限体積で定義される繰り込んだ結合定数の振舞いを調べ、この理論に繰り込み群の赤外固定点が存在することが分かった [1]。この結果を踏まえて、赤外固定点上に実現される共形場理論の性質を調べている。昨年度は、複合演算子に関して新しい繰り込みスキームを提案し、格子サイズ  $(20^3 \times 40)$  までのデータを生成し、TPL scheme で調べた固定点直上で擬スカラー演算子の異常次元を測定した [9, 3]。しかしながら、この結果は系統誤差の見積が不十分であった。

そこで、今年度は、格子サイズ  $24^3 \times 48$  の配位データを新たに生成し、連続極限を取るときの系統誤差を見積もれるようにした。また、 $16^3 \times 32$  や  $20^3 \times 40$  のデータも統計量を増やした。

#### A-1 : step scaling 法による異常次元の測定

擬スカラー演算子の波動関数くりこみは、PCAC 関係式を通じてフェルミオンの質量のくりこみ因子と関係付けられる。我々は、擬スカラー演算子の2点関数から擬スカラー演算子の新しいくりこみスキームを提案した [9]。

$$Z_P = \sqrt{\frac{C_P^{\text{tree}}(t)}{C_P(t)}} \text{ at fixed } t, \quad (1)$$

ここで、 $C_H(t) = \sum_{\vec{x}} \langle P(t, \vec{x}) P(0, \vec{0}) \rangle$  であり、 $P(t, \vec{x})$  は擬スカラー演算子である。我々は、空間的な方向である  $x, y$  方向に twisted な境界条件を導入しゼロモードを殺しているため、質量ゼロのフェルミオンに対してもこれらの2点間数を計算することができる。

格子上でこの  $Z$  因子のエネルギースケール依存性を表す量が、「(格子上の)mass step scaling 関数 ( $\Sigma_P$ )」である。これは、格子の物理的な大きさを  $s$  倍した時の  $Z$  因子の成長比として与えられる。

$$\Sigma_P(\beta, a/L; s) = \frac{Z_P(\beta, a/sL)}{Z_P(\beta, a/L)}. \quad (2)$$

この時、 $\beta$  と  $a/L$  は、繰り込んだ結合定数を一定とするように tune しておく。そして、この繰り込んだ結合定数を一定とするように連続極限を取ることで連続極限での mass step scaling 関数 ( $\sigma_P(u)$ ) を得る。ここで、 $u$  は繰り込んだ結合定数の2乗 ( $u = g_R^2(L)$ ) である。

質量の異常次元は、この mass step scaling 関数から与えられ、特にスケール不変性のある固定点上では、

$$\gamma_m^*(u^*) = -\frac{\log |\sigma_P(u^*, s)|}{\log |s|}. \quad (3)$$

となる。ここで  $u^*$  は固定点での結合定数の値である。

我々は、この質量のくりこみ因子から、step scaling 法を用いて、赤外固定点での質量の異常次元を導出した。SU(3) Nf=12 の理論に対して、step scaling 法を用いて異常次元を導出したのは、本研究が初めてである。

固定点上の繰り込んだ結合定数を一定とする  $\beta$  と  $L/a$  は表 1 で与えられる事がこれまでの研究で分かった。

これらのパラメータを用いて、式 (2) の格子上の mass step scaling 関数を測定すると図 2 のようになった。連続極限での mass step scaling 関数の値から、固定点における質量の異常次元を求めると、

$$\gamma_m^* = 0.081 \pm 0.018(\text{stat.}) \pm_{-0}^{+0.025}(\text{sys.}). \text{ (preliminary)} \quad (4)$$

		$g_{\text{TPL}}^2 = 2.475$	$g_{\text{TPL}}^2 = 2.686$	$g_{\text{TPL}}^2 = 2.823$
$L/a$	$T/a$	$\beta$	$\beta$	$\beta$
8	16	5.796	5.414	5.181
10	20	5.998	5.653	5.450
12	24	6.121	5.786	5.588

表 1: The values of  $\beta$  for each  $L/a$  which give the TPL coupling constant at the IRFP.

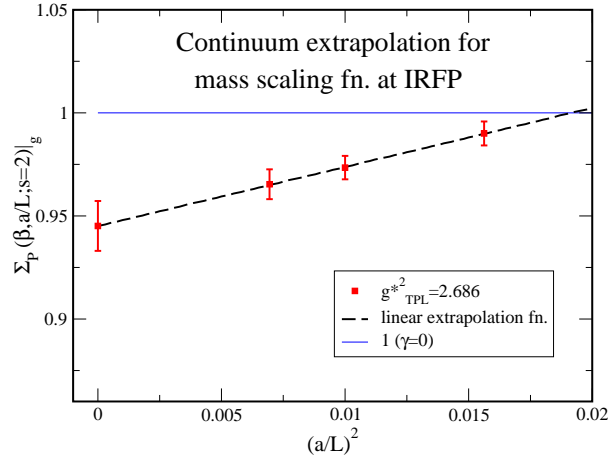


図 2: Continuum extrapolation for the mass step scaling function at  $g_{\text{TPL}}^{*2} = 2.686$ .

となった。

#### A-2 : Dirac 演算子の固有モード数のハイパースケーリングによる異常次元の導出

非自明な相互作用をする固定点近傍における質量の異常次元の導出法は、これまでに以下のようにいくつか提案されている。

- (1) くりこみ群的な思想に基づく step scaling 法
- (2) 固定点上の理論を質量変形して、ハドロンのスペクトルのフェルミオンの質量に対するスケールリング則から出す方法 [10]
- (3) Dirac 演算子の固有モード数に関するスケールリング則から出す方法 [11]

本来なら、固定点近傍での臨界指数である異常次元は、全て同じ値になるはずだが、現状としては手法によって優位に異常次元の値に差が見られた。この理由は、他の研究での格子シミュレーションのパラメータが、固定点近傍を実現してしない可能性もある一方で、我々の研究でも離散化誤差の見積が不十分であることが懸念されていた。この問題を解決するため、上記プロジェクト A-1 の step scaling 法で用いたゲージ配位を用いて、(3) の手法であるハイパースケーリング法で異常次元の振る舞いを調べた。

Dirac 演算子の固有値を  $\omega$  とする。これがあるカットオフ ( $\lambda$ ) 以下である、単位体積あたりのモード数を  $\nu(\lambda)$  とすると、これは数密度関数  $\rho(\lambda)$  を用いて、

$$\nu(\lambda) = 2 \int_0^\lambda \rho(\omega) d\omega. \quad (5)$$

で与えられる。

無限体積かつ連続極限での赤外固定点では全  $\lambda$  の領域で、モード数のハイパースケーリング則は固定点における質量の異常次元  $\gamma_m^*$  を用いて

$$\nu(\lambda) = C_0 \lambda^{\frac{4}{1+\gamma_m^*}}, \quad (6)$$

とスケールする。有限体積では、小さな  $\lambda$  の領域に有限体積効果が現れ、また格子上では格子間隔  $a$  によって大きな  $\lambda$  の領域にこのスケーリング則からのずれが現れる。しかしながら、その中間領域にある  $\lambda$  では、格子上のデータにもこのハイパースケーリング則が現れると期待されている。

この  $\lambda$  の領域を知るために、赤外固定点上ではスケール変換  $a \rightarrow a' = a/s$  の下で、

$$a\lambda \rightarrow a\lambda' = s^{-(1+\gamma_m^*)} a\lambda, \quad (7)$$

が成り立つ事を用いる。つまり、表 2 で示した、固定点での結合定数を与える格子セットアップを用いると、以下 2 つのことが予想される。

1. スケール変換、式 (7) の下で、格子データは連続極限に近づくに連れ  $\nu(\lambda)$  は同じ形になる「スケーリング領域」が現れる
2. そのスケーリング領域では、質量の異常次元の値は、step scaling 法で求めた  $\gamma_m^*$  の値 (式 (4) と無矛盾である

これを調べるために、我々はプロジェクター法 [12] を用いて、表 2 に示した格子パラメータに対して、Dirac 演算子のモード数を測定した。各格子サイズにおいて、小さい格子サイズのものでは  $\Delta(a\lambda) = 0.02$  毎に、大きい格子サイズのものでは  $\Delta(a\lambda) = 0.01$  毎にモード数を測定した。各格子サ

$\beta$	$L/a$	$T/a$	$\Delta(a\lambda)$	sL/a	sT/a	$\Delta(a\lambda)$
5.414	8	16	0.02	16	32	0.01
5.653	10	20	0.02	20	40	0.01
5.786	12	24	0.02	24	48	0.01

表 2: The values of  $\beta$  for each  $L/a$  which give the TPL coupling constant at the IRFP.

イズで測定したゲージ配位の数 30 で、それぞれの配位は 100–200 Monte Carlo トラジェクトリーずつ離れた。測定したモード数は、 $100 < \nu(\lambda) < 2,000$  の領域である。

その結果を図 3 に示す。各パネルでは同じ  $\beta$  で格子サイズ (の各方向) を 2 倍変えたものを重ねて描いた。ただし、ここで小さい格子サイズ ( $(L/a)^3 \times (T/a)$ ) に対しては、横軸を式 (7) を用いてリスケールしている。誤差はブートストラップ法を用いて見積もり、統計誤差のみを示した。これを見ると、最も連続極限に近い一番右のパネル (格子サイズ  $12^3 \times 24$  と  $24^3 \times 48$ ) では、リスケールした 2 つの格子データが重なる領域があり、そこでの質量の異常次元の値は  $0.05 < \gamma_m^* < 0.08$  くらいであることがわかる。この値は、プロジェクト A-1 の step scaling 法と無矛盾であり、期待どおりである。それより連続極限から遠いデータ (図左と中央) では、どちらのパネルでも大きい方の格子サイズのデータは、step scaling 法で得られた執拗の異常次元と無矛盾な領域に  $\gamma_m^*$  の値が集まっており、各パネルの小さい方の格子サイズのデータの有限体積項が大きいためではないかと考えられる。

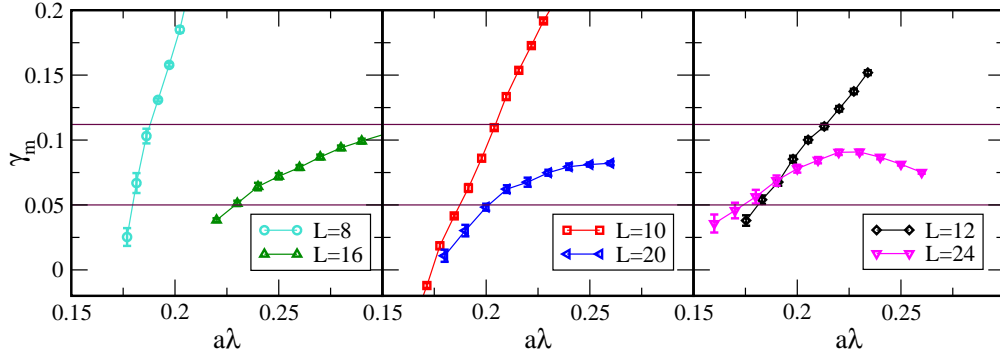


図 3: Mass anomalous dimension from the hyperscaling analysis. The region between two straight lines at  $\gamma_m = 0.050$  and  $0.112$  denotes  $1\text{-}\sigma$  bound of the result for the step scaling method.

以上、プロジェクト A-1, A-2 の結果は、今年の Lattice 国際会議でも発表し [4]、現在は本論文としてまとめている。またプロジェクト A-3, B は、現在進行中の大型シミュレーション研究において、研究を継続中である。

## 参考文献

- [1] E. Itou, PTEP **2013**, no. 8, 083B01 (2013) [arXiv:1212.1353].
- [2] E. Itou, PoS (Lattice 2013) 005, arXiv:1311.2676 [hep-lat].
- [3] E. Itou, PoS (Lattice 2013) 481, arXiv:1311.2998 [hep-lat].
- [4] E. Itou and A. Tomiya, arXiv:1411.1155 [hep-lat].
- [5] M. Asakawa *et al.* [FlowQCD Collaboration], Phys. Rev. D **90**, 011501 (2014) [arXiv:1312.7492 [hep-lat]].
- [6] J. Kuti, PoS (Lattice 2013) 004
- [7] M. Hayakawa, K. -I. Ishikawa, Y. Osaki, S. Takeda, S. Uno and N. Yamada, Phys. Rev. D **83**, 074509 (2011)
- [8] T. Appelquist, R. C. Brower, M. I. Buchoff, M. Cheng, S. D. Cohen, G. T. Fleming, J. Kiskis and M. Lin *et al.*, arXiv:1204.6000 [hep-ph].
- [9] E. Itou, arXiv:1307.6645 [hep-lat].
- [10] L. Del Debbio and R. Zwicky, Phys. Rev. D **82**, 014502 (2010) [arXiv:1005.2371 [hep-ph]].
- [11] A. Patella, Phys. Rev. D **86**, 025006 (2012) [arXiv:1204.4432 [hep-lat]].
- [12] L. Giusti and M. Luscher, JHEP **0903**, 013 (2009)