

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400248

研究課題名(和文) 格子QCDによる核子のフレーバー構造の研究

研究課題名(英文) Study of flavor structure of nucleon by lattice QCD

研究代表者

大野木 哲也 (Onogi, Tetsuya)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：70211802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：核子のフレーバー構造の解明に必要な遷移行列の格子QCD計算において、紫外発散による演算子混合があるため正しい評価が困難である。そこで格子上の演算子の繰り込みの新しい手法の開発が必要となっている。

我々はフロー方程式の解が有限という性質に着目して新しい演算子の繰り込みを研究することを目標とした。我々は3次元 $O(N)$ スカラー理論において $1/N$ のnext-to-leading orderでフローされた場が有限であることを示した。また誘導計量によって定義された時空が固定点近傍でAdS時空に近づくというAdS/CFT対応と密接な関係がある結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The lattice QCD calculation of matrix element to reveal the flavor structure of nucleon is difficult due to operator mixings from UV divergence, so that a new renormalization method on the lattice is needed.

We study the renormalization of new operators based on the flow equation,

We showed that the field flowed is finite at next-to-leading order in  $1/N$  for 3d  $O(N)$  scalar theory. Moreover, there is a close relation with AdS / CFT correspondence that the spacetime defined by induction metering approaches the AdS spacetime near the fixed point.

研究分野：素粒子論

キーワード：Gradient flow Renormalization Lattice

## 1. 研究開始当初の背景

クォークの相互作用のフレーバー構造を解明することは標準模型を超える新しい物理の探求に重要な知見を与える。クォークの反応をみるには陽子や中性子などの核子を用いた加速器衝突実験や精密実験は有用な方法のひとつである。クォークの反応を実験で測定される核子の反応から解き明かすには、格子 QCD 理論などの非摂動的手法を用いた手法が必要である。標準模型を超える物理の寄与は一般的には質量次元が 5, 6 などの高次演算子で表されることが多いが、格子上では量子補正を通じて質量次元の低い演算子と混合があるため、格子計算において新しい物理の寄与だけを正しく取り出す事が困難である。そこで、格子上の演算子の繰り込みの新しい手法の開発が必要となっていた。

## 2. 研究の目的

グラディエントフローは場の理論において仮想時間を導入し、一種の拡散方程式で発展させる手法である。Luscher-Weisz によって発展した場からなる任意の演算子が有限であることが証明された。この性質からこれまで困難であった格子上のエネルギー運動量テンソルの構成がなされるなどの応用が発展している。そこで核子の性質を探る上で重要な課題としてグラディエントフローを用いた新しい演算子の繰り込みを研究することを目標とする。

## 3. 研究の方法

まず解析的に解けるモデルにおいてグラディエントフローの方法を定式化し、方程式の解を解析的に求め、QCD と同様に Luscher-Weisz の定理が成り立つかどうかを調べる。次にその解をもとに演算子の繰り込みの新しい定義を構築し、その性質を調べる。具体的にはまず QCD の場合に Luscher-Weisz によって示されたようなフローされた場で構成される任意の複合演算子が有限であることが示されるかを調べる。もしそれが示されたら、次にフロー時刻の逆数を繰り込みスケールとおき繰り込み条件をフロー時刻での「有限な」物理量の期待値によって定義することで、繰り込まれた結合定数あるいは繰り込まれた演算子を定義することを試みる。

## 4. 研究成果

まず QCD で定義されたグラディエントフローを方程式を  $O(N)$  スカラー理論にも拡張する方法を考察した。その結果、非線形に実現された対称性を有する場の理論においては場の空間での対称性に対する不変計量を導入し、フロー方程式を共变的な形に拡張すると対称性を保つフロー方程式が得られるこ

とを発見した。これを超対称ヤンミル理論に適用してフロー方程式の超対称拡張を構築すると確かにスーパーゲージの対称性は、グラジエントフローにおいて保存されていることがわかった。さらに、ゲージの自由度を減衰させるために適切な修正項を選択すると、Wess-Zumino ゲージ内で閉じたフロー方程式を得た。

この方法をラージ  $N$  極限で解析に解くことができる  $O(N)$  スカラー場の理論について青木慎也、菊地健吾氏とともに 2 次元の非線形  $O(N)$  シグマ模型に適用し、Schwinger-Dyson 方程式をラージ  $N$  極限で解くことで、フロー方程式のラージ  $N$  極限での厳密解を得る事に成功した。さらにフローされた場がラージ  $N$  極限で非摂動的に有限であることも示した。またフローされたスカラー場によって定義される  $2+1$  次元の誘導計量を用いて、 $2+1$  次元の時空を定義すると UV の固定点近傍に対応するフロー時刻  $t=0$  付近で時空は漸近的に 3 次元の AdS 空間に近づくことが分かった。

さらに青木、Balog、Weisz とともに 3 次元  $O(N)$  スカラー場理論への拡張を行い、1) フローされた場の波動関数の繰り込みさえ行えばラージ  $1/N$  の next-to-leading オーダーで任意のフローされた場で作られる任意の複合演算子が有限であることを示した。2) 次にフローされた場による 4 点結合を用いて繰り込まれた結合定数を定義でき、繰り込み群の UV 固定点と IR 固定点 (Wilson-Fischer 固定点) の両方の性質を正しく再現することも示した。3) さらにフローされた場を用いて  $3+1$  次元の誘導計量を用いて時空を定義すると紫外固定点に対応するフロー時刻  $t=0$  付近と赤外固定点に対応する  $t=\infty$  付近で漸近的に AdS 時空に近づくという結果を得た。その際の IR での AdS の半径は UV での半径に比較するとラージ  $N$  の leading order で等しく、next-leading order で現象することが分かった。これは 3 次元の F 定理から得られる結果と定性的には一致している。これらの結果は AdS/CFT 対応は密接な関係がある示唆に富む発見である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

H. Fukaya, T. Onogi, S. Yamamoto, R. Yamamura, " Six-dimensional regularization of chiral gauge theories on a lattice ", Proceedings of Science 査読なし、LATTICE2016, 2017, pp.330-1~pp.330-14

S. Aoki, J. Balog, T. Onogi, P.

Weisz, "Flow equation for the large N scalar model and induce geometries", Progress of Theoretical and Experimental Physics 査読あり 2016, 2016, pp. 083B04-1-p.p. 083B04-22

A. Kagimura, T. Onogi, "Relaxation time of the fermions in the magnetic field (I) - the case for relativistic fermions -", Proceedings of Science 査読なし, LATTICE2016, 2016, pp.379-1~pp.379-7

A. Kagimura, T. Onogi, "Relaxation time of the fermions in the magnetic field (II) - away from strong magnetic limit", Proceedings of Science 査読なし, LATTICE2016, 2016, pp.381-1~pp.381-7

A. Kagimura, T. Onogi, "Bosonization approach for "atomic collapse" in grapheme", JHEP 査読あり 1602, 2016, pp092-1~pp 092-19

S. Aoki, K. Kikuchi, T. Onogi, "Encoding field theories into gravities", Proceedings of Science 査読なし, LATTICE2015, 2016, pp.299-1~pp.299-7

K. Kikuchi, T. Onogi, "Generalized gradient flow equation and its applications", Proceedings of Science 査読なし, LATTICE2015, 2016, pp.305-1~pp.305-7

S. Aoki, K. Kikuchi, T. Onogi, "Geometries from field theories", Progress of Theoretical and Experimental Physics 査読あり, 2015, 2015, pp.156-1~pp. 256-7

S. Aoki, K. Kikuchi, T. Onogi, "Gradient flow of O(N) nonlinear sigma model at large N", JHEP 査読あり, 1504, 2015, pp.156-1~pp.156-20

K. Kikuchi, T. Onogi, "Generalized Gradient flow equation and its application to super Yang-Mills theory", JHEP 査読あり, 1411, 2014, pp.094-1~pp.094-34

T. Onogi, "Hidden exact symmetry in grapheme." Proceedings of Science 査読なし, LATTICE2014, 2014, pp.019-1~pp.019-15

〔学会発表〕(計 4 件)

鍵村亜矢、大野木哲也 磁場中のフェルミオンの散乱時間 I, 日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 20 日

A. Kagimura, T. Onogi, "Relaxation time of the fermions in the magnetic field (II) - away from strong magnetic limit", poster presentation at Lattice 2016 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016, 参加者約 370 名)

T. Onogi, "Six dimensional regularization of chiral gauge theories", Topological Materials Science: Intensive-Interactive Meeting (at Keio university, November 17-18, 2016, 参加者約 40 名)

T. Onogi, "Hidden exact symmetry in grapheme." Plenary talk at the 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2014) Columbia University, New York June 23-28, 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
大野木哲也 (ONOGI, Tetsuya )

大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：70211802

(2)研究分担者 該当なし  
( )

研究者番号：

(3)連携研究者 該当なし  
( )

研究者番号： 該当なし

(4)研究協力者  
( )