

令和 5 年 4 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03923

研究課題名（和文）摂動QCDの精密化による高エネルギー精密物理の新展開

研究課題名（英文）Novel approach to high-energy precision physics by refinement of perturbative QCD

研究代表者

隅野 行成（Sumino, Yukinari）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80260412

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高精度なQCD計算を実現するために、摂動計算から効率的にリノーマロンを除去することが近年ますます重要になってきている。元々QCDポテンシャルに対して私が開発したリノーマロン除去法を、一般のオブザーバブルに適用できるように拡張し、新たにFTRS法とDSRS法を（共同研究者と共に）開発、提唱した。特に任意のオブザーバブルに対してdual spaceが存在して、そこではリノーマロンがなくなるという新しい概念を提唱した。これは、将来摂動QCDとOPEに基づく高精度理論計算の礎となることが期待される。また、DSRS法を応用して小林益川行列要素 $|V_{cb}|$ の決定を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の高エネルギー物理学の最先端では、QCDによる理論計算の高精度化が必要不可欠となっている。それは、様々な高エネルギー現象の理論計算において、その精度を定めているのはQCDの理論計算の部分だからである。また近年は、QCDの詳細な研究を通じて（素粒子理論の土台である）場の量子論をより深いレベルで理解しようという方向性も重視されている。今回開発したリノーマロン除去法は、これらの目的を実現するための理論的な礎を与えると期待される。またその応用例として行なった基礎物理定数 $|V_{cb}|$ の決定は、かねてより問題となっていた「 $V_{cb}$ パズル」に関して、理論計算の信頼性の検証を与えた。

研究成果の概要（英文）：In recent years, it is becoming more important to subtract renormalons efficiently from perturbative calculations, in order to achieve high precision QCD calculations. A renormalon subtraction method, which I originally developed for the QCD potential, was extended for application to general observables, where I developed and proposed the FTRS method and DSRS method (with collaborators). In particular, we proposed a new concept that there exists a dual space for any observable, in which renormalons are suppressed. I expect that these methods will become the basis for high-precision theoretical calculations based on perturbative QCD and OPE in near future. Also, by applying the DSRS method, we determined the Kobayashi-Maskawa matrix element  $|V_{cb}|$  from the OPE of the B meson semileptonic decay width.

研究分野：摂動QCD計算

キーワード：リノーマロン 摂動計算 物理基礎定数 QCD

## 1. 研究開始当初の背景

Higg 粒子発見後の高精度 LHC 実験、及び Belle II 実験 (Super B ファクトリー) の時代に入り、QCD による理論予言の高精度化が必要不可欠となっている。それは、Higgs 粒子やトップクォークの性質の精密測定や新物理探索を行なう際、及び高精度フレーバー物理による新物理探索の際に、本質的に重要な役割を果たす。私は長年摂動 QCD に基づく高精度計算と、それらを用いた高エネルギー現象論の研究や基礎物理定数の決定などを行ってきた。実際、現在及び過去の Particle Data Group (PDG) による  $m_c$  と  $m_b$  の決定には我々の研究成果が採用されている。また最近、我々が開発したリノーマロン除去法を用いて、強い相互作用の結合定数  $s$  の高精度決定を行なった。これらの基礎物理定数の決定においては、その精度を上げるために理論的發展が必要であり、一旦決定されると様々な予言に対するインプットパラメーターとなる。

近年の摂動 QCD や格子 QCD 計算の発展に伴って QCD の理論予言精度は様々な物理量に関して大きく向上している。一方で QCD の理論予言において摂動 QCD 部分には、ループ積分の IR 領域から生じる「リノーマロン不定性」が含まれる。リノーマロン不定性は摂動次数を上げて減少せず、近年の高次摂動計算に依存する高精度予言においてはこの寄与が無視できなくなりつつある。ただし、Wilson 流の演算子積展開(OPE)の枠組みでは、概念的には UV と IR の寄与を factorize するので、前者(Wilson 係数)の摂動計算から本来はリノーマロンを取り除くべきである。しかしながらその方法の開発はまだ模索段階で確立していない。

私は QCD ポテンシャルの OPE において Wilson 係数からリノーマロンを複数同時に除去する方法を開発し、それを JLQCD グループによる格子 QCD 計算と組み合わせ、 $s$  の高精度決定を行なった。リノーマロン除去の結果、摂動 QCD の安定で精度の良い予言を従来よりも低いエネルギースケールで実現することに成功した。そしてリノーマロンの除去によって理論的な期待とよく合致した振る舞いが確認できた。

以上の状況に鑑み、上記のリノーマロン除去法を QCD ポテンシャル以外の物理量へ一般化して、様々な物理量の QCD 理論計算の精度を上げるための理論形式を構築することは重要であると考えた。また、様々な重要な物理量の高精度決定は、新しいリノーマロン除去法の有用性を示すのに適した応用問題であると考えた。

## 2. 研究の目的

研究目的は、一般の物理量の OPE において、(QCD 理論計算の不定性の要因である)リノーマロンを分離・除去するための理論的枠組みを構築すること、そしてそれを用いて様々な物理量、特に重要な物理量の高精度の理論計算を実現することである。例えば、 $B \rightarrow Xc l$  semileptonic 崩壊幅、 $B, D$  メソン質量、Adler 関数などをリノーマロンを除去した OPE を用いて高精度で計算し、これらから、小林益川行列要素などの基礎物理定数、及び OPE に普遍的に現れる非摂動行列要素を高精度で決定する。これらの研究を通じて、将来の QCD 理論予言の高精度化への理論的基礎付けを与える。

## 3. 研究の方法

まず概略は以下のとおりである。(1)どのような理由で QCD ポテンシャルの場合には摂動級数からリノーマロンを分離することができたのか、その原理を理解する。(2)理解した原理を使って一般の物理量の OPE に対してリノーマロン除去の方法を定式化する。(3)その方法を様々な物理量に適用して、理論的な期待と合致した結果が得られるかを確認する。(4)さらにリノーマロン除去の方法を改良する。LO の Wilson 係数だけでなく、OPE 中の全ての Wilson 係数からリノーマロンを同時に除去するための理論的枠組みを構成し、非摂動行列要素との間でのリノーマロン相殺のメカニズムを理解する。(5)  $B$  の semileptonic 崩壊幅についてリノーマロン除去を行ない、それを用いて  $|V_{cb}|$  を決定する。

詳細については以下のとおりである。

(1) (私自身が開発した)QCD ポテンシャルに適用可能であったリノーマロン除去法の要点は、「フーリエ表示によって被積分関数がリノーマロンを含まない(または抑制された)1重積分表示を得られること」にあることを明らかにした。このことは、フーリエ変換の性質から非摂動的に示される。そして繰り込み群と複素平面上での積分路変形を組み合わせることによって、OPE と整合した形でリノーマロンを分離・除去している。

(2)上の原理を使って、一般の物理量に適用できる、フーリエ変換を使ったりノーマロン除去法である FTRS 法を開発した。この方法は Wilson 係数の有限次数の摂動級数から構成でき、かつ、高次で PV スキームによる通常の(Borel resummation による)リノーマロン除去法に収束することを示した。

(3)FTRS 法の有効性を確認するために以下のテスト解析を行なった。Adler 関数から  $O(1/N^4)$  リノーマロンを除去して、OPE と現象論的モデルによる予言の比較から、local gluon condensate 及び  $\bar{s}s$  flavor を決定した。特にリノーマロン除去の効果が顕著な領域で、

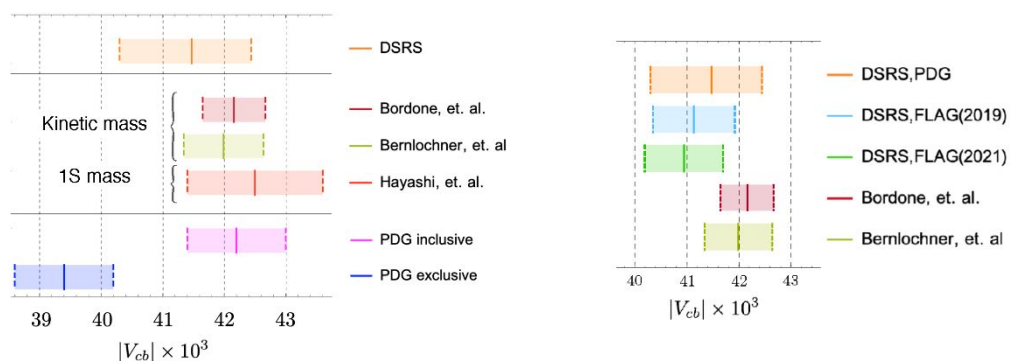
OPE との整合性が確かめられたことは非自明である。B, D メソン崩壊幅から  $O(1)$  リノーマロンを除去して、除去しない場合の計算と比較した。B, D メソン質量から  $O(1)$  と  $O(1/2)$  リノーマロンを同時に除去した。その結果として、HQET の OPE に現れる非摂動パラメーターである  $\bar{c}$  及び  $\mu_{1/2}$  を決定した。以上、 $\bar{c}$  及び  $\mu_{1/2}$  いずれの場合も理論の期待とよく合致した振る舞いを確認した。それぞれの物理量の LO の Wilson 係数から同時に複数のリノーマロンを除去し、摂動級数の収束性が向上することを確認した。

(4) FTRS 法の収束性を改良したリノーマロン除去法である、dual space に基づくリノーマロン除去法 (DSRS 法) を新たに開発した。フーリエ変換の代わりにラプラス変換を用いて、より収束性を改善した。また、dual space を用いた物理量の 1 重積分表示に expansion-by-regions (EBR) 法を適用して、一般のオブザーバブルの OPE を構成した。この表示を用いて、OPE 全体におけるリノーマロン相殺のメカニズムを初めて系統的に調べることが可能となった。特に (可解モデルである) 2 次元  $O(N)$  非線形シグマモデルのいくつかのオブザーバブルの OPE に適用して、非自明なリノーマロン相殺のメカニズムを具体的な計算で示した。そして DSRS 法で Wilson 係数の摂動級数からリノーマロンを除去することによって高精度の理論予言が可能となることをシミュレーションで示した。また、QCD に DSRS 法をどのように適用するかを考察した。

(5) DSRS 法を B, D メソン質量、及び B メソンの semileptonic 崩壊幅の OPE に適用した。各物理量の LO の Wilson 係数から主要な 2 つのリノーマロンを除去し、対応する非摂動効果を含む OPE による理論予言を与えた。リノーマロン除去によって Wilson 係数の収束性が向上し、摂動的な不定性が減少することを示した。これらを用いて初めて MSbar 質量スキームで  $|V_{cb}|$  を決定した。この結果を他の質量スキームによる  $|V_{cb}|$  決定の値と比較検討した。(この比較のための予備的な研究として、bottomonium スペクトルに基づく 1S 質量スキームを用いた  $|V_{cb}|$  決定も行なった。)

#### 4. 研究成果

- (1) 元々 QCD ポテンシャルに対して開発したリノーマロン除去法を一般のオブザーバブルに適用できるように拡張し、新たに FTRS 法とその改良版である DSRS 法を開発・提唱した。特に任意のオブザーバブルに対して dual space が存在して、そこではリノーマロンがなくなる、または抑制されるという概念的に新しい性質 (機構) を発見した。この dual space での収束級数の逆 dual 変換は 1 重積分 (ラプラス変換) で表され、これに EBR 法を適用すると、リノーマロンを分離した OPE が得られる。そしてその表式を用いて、OPE 全体でのリノーマロン相殺のメカニズムを初めて系統的に確認できるようになった。この定式化を基に、自然にリノーマロンを除いた OPE が構成された。このリノーマロン除去の定式化は、将来摂動 QCD と OPE に基づく高精度理論計算の礎となることが期待される。
- (2) 開発した FTRS 法と DSRS 法を様々な物理量に適用してところ、理論的な期待に合致して、理論予言の精度が向上することが確認できた。特に DSRS 法を B, D メソン質量、及び B メソンの semileptonic 崩壊幅の OPE に適用して、リノーマロン除去によって収束性が向上することを示し、これらからリノーマロンを除去した非摂動効果を含む理論予言を与えた。それを用いて初めて MSbar 質量スキームで  $|V_{cb}|$  を決定した。得られた結果は、 $|V_{cb}| = 0.0415 \pm 10^{-12}$  である。この結果を他の質量スキームによる  $|V_{cb}|$  決定の値と比較した。(左下図) 一見 DSRS 法による  $|V_{cb}|$  の精度が kinetic 質量スキームによる決定値に比べて精度が悪いように見えるが、適切にインプット b, c MSbar 質量の精度を両方で揃えると、互いに整合する結果となっていることが確認される。(右下図) これによって、inclusive 法と exclusive 法で  $|V_{cb}|$  の値が一致しないという、かねてより問題となっていた「Vcb Puzzle」に対して、inclusive 法の理論計算には問題がないという一つの検証を与えた。(その一方で、最近、実験値が動いて不一致が解消される傾向が見られることは興味深い。)



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Y. Hayashi, Y. Sumino and H. Takaura	4. 巻 2
2. 論文標題 Renormalon subtraction in OPE using Fourier transform: formulation and application to various observables	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 016-1,62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2022)016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y. Hayashi, Y. Sumino and H. Takaura	4. 巻 829
2. 論文標題 Determination of $ V_{cb} $ using $N^3\text{LO}$ perturbative corrections to $\Gamma(b \rightarrow c\ell\bar{\nu})$ and $1S$ masses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 137068-1,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2022.137068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 P.A. Zyla, et al.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Review of Particle Physics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083C01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Sumino, H. Takaura	4. 巻 5
2. 論文標題 On renormalons of static QCD potential at $u = 1/2$ and $3/2$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 116-1,31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2020)116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hayashi, Y. Sumino and H. Takaura	4. 巻 819
2. 論文標題 New method for renormalon subtraction using Fourier transform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 136414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R.L. Workman, et al.	4. 巻 2022
2. 論文標題 Review of Particle Physics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083C01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yukinari Sumino
2. 発表標題 Renormalon subtraction in $ V_{cb} $ determination
3. 学会等名 KEK-FF (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukinari Sumino
2. 発表標題 Renormalons in QCD
3. 学会等名 KIT Particle Physics Colloquium (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukinari Sumino
2. 発表標題 Perturbative calculations
3. 学会等名 Bad Honnef Physics School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 隅野行成
2. 発表標題 EFT for Heavy Quarkonium
3. 学会等名 第2回EFT勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukinari Sumino
2. 発表標題 Top and QCD
3. 学会等名 ILC合宿 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuuki Hayashi
2. 発表標題 New method for renormalon subtraction using Fourier transform
3. 学会等名 QWG2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------