

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400238

研究課題名(和文) 摂動QCDに基づくトップクォークの精密物理

研究課題名(英文) Precision Physics of Top Quark Based on 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1)LHC 実験で粒子の性質を精密測定するためのWeight function methodを確立・実用化に向けて発展させた。実験家と協力してトップクォークの質量決定に必要な詳細な解析を実行した。(2)将来のリニアコライダー実験で原理的に30 MeV 精度で $m_t$  が測定可能であることを、最新の理論計算の進展を取り入れて示した。(3)同じ方法を応用して、ボトムとチャームクォークの $M_{Sbar}$ 質量を高精度決定し、Particle Data Group (PDG)の最新の決定に採用された。(4)私はPDGのトップクォーク部門担当に任命され、トップクォークデータのコンパイルを行なっている。

研究成果の概要(英文)：(1) I have developed the "Weight function method," which enables precise measurements of particle properties in high energy experiments, towards practical applications in the LHC experiments. In collaboration with experimentalists I performed detailed analyses necessary for top mass precise determination using this method. (2) I showed that in principle  $m_t$  can be measured with about 30 MeV accuracy in future linear collider experiments, by incorporating recent theoretical developments in higher-order corrections. (3) Applying the same method, I determined the  $M_{Sbar}$  masses of the charm and bottom quarks. The determined values were adopted as the most recent determinations in the 2016 edition of the Particle Data Group (PDG). (4) I was appointed as the encoder of the top quark session in PDG, and have been compiling the newest data on top quark properties.

研究分野：摂動QCD

キーワード：トップクォーク 基礎物理定数 クォーク質量 摂動QCD 精密測定

### 1. 研究開始当初の背景

かねてより私は重いクォーク (b, c, t) の質量の精密決定に関する理論研究を行ってきた。実際、当時の Particle Data Group (PDG) による mb の決定には、私の研究結果が採用されていた。また、将来のリニアコライダー (ILC) 実験における mt の精密決定に関しても私は多くの理論研究を行ってきた。

重いクォークの質量を精密決定することの主な物理的意義は以下の通りである。例えば、b, c, t の質量を、(分岐比や断面積から測定される) ヒッグス粒子とこれらのクォークとの湯川結合と比較することによって、標準模型のクォーク質量生成機構が正しいかを検証する。また標準模型を超える物理の検証において、トップの質量がしばしば重要な役割を果たす。例えば最小超対称標準模型 (MSSM) においては、ヒッグス質量  $m_H$  は他のパラメータで表される重要な予言値であるが、mt の 4 乗に比例する 1 ループ補正は大きく、かつ mt の値に強く依存する。様々な応用に鑑みて mt を 0.1 GeV 以下の精度で知ることは重要であると認識されていた。その他でも重いクォークの質量は、フレーバー物理の種々の現象論的解析の重要なインプット・パラメータとなっている。例えば、現在の b クォークの  $\overline{MS}$  質量の精度は、b と tau 粒子の質量比を予言する超対称 SU(5) 大統一モデルへの強い制限を与えている。LHCb/Super-B factory 実験においても、色々な物理量を理論的に予言する際のインプットとして  $m_b$  が重要である。(e.g. b クォークの崩壊幅は  $m_b^4$  に比例するので、 $m_b$  の値に強く依存する。)

私は長年 LHC 実験でトップクォークの諸性質、特に  $\overline{MS}$  質量を高精度測定するための方法を考察してきた。そして、2011 年に物理量の新しい測定方法 weight function method を開発・提唱した。この方法は次の特徴を持つ：(1) レプトンエネルギー分布だけを用いる。ジェットの情報を使わないので、hadronization モデルへの依存性や、ジェット再構成に関する不定性などの影響が(ほとんど)ない、(2) 理想的にはトップクォークの速度分布に依存しないため、パートン分布関数(PDF) や initial-state radiation の不定性の影響が小さく抑えられる。即ち、理想的極限で hadronization や PDF などのモデルの介在無しに、実験値と摂動 QCD の計算結果の直接比較からトップの諸性質を測定することができる方法となっている。

一方で、かねてより私は、摂動 QCD に基づく束縛状態の理論を用いて、重いクォークの諸性質を理論的に研究してきた。2010 年には、QCD ポテンシャルに対する 3 ループ補正を計算した。その後多重ゼータ値の理論に基づいて摂動高次補正の解析的計算のための新しい方法を開発し、それを応用して重いクォークのスペクトルに対する 3 次補正の解析計算を完成させた。これらの理論計算の

進展により、クォークのスペクトルやその他の物理量から、高精度で重いクォークの質量などの性質を決定することが原理的に可能となった。

### 2. 研究の目的

ヒッグス粒子発見後の LHC 時代において、フェルミオンの質量生成機構の検証、電弱対称性の破れのメカニズムの検証、等を目的に、摂動 QCD に基づき、現在の LHC 実験及び将来の ILC 実験におけるトップクォークの諸性質の高精度測定のための理論的解析手法を確立する。そのために必要な理論計算を行なう。更にこれらを応用した現象論的解析を行なう。

以前に自ら提唱した Weight function method を、実験環境を考慮した詳細なシミュレーション解析、及び weight function に対する高次の摂動 QCD 補正計算を進めて、現実の LHC 実験で使える方法に発展させる。具体的には、系統誤差を小さく抑えるためのカットの工夫やレプトン分布の補間法の開発を行なうこと、及び weight function に対する NLO 及び NNLO 摂動 QCD 補正を計算して理論的な不定性を少なくすることである。

一方でこれまでに計算したクォークのスペクトルの理論式を用いて、ILC 実験におけるトップクォーク threshold 領域での断面積のスキャンからトップクォーク  $\overline{MS}$  質量を決定する際の理論的な誤差を精査し、最適な方法を見出す。またこの方法を他の様々な物理量に対して応用する。

### 3. 研究の方法

(1) バックグラウンド、及び、より現実的なカットの効果を含めたシミュレーション解析を行ない、解析手法を洗練して、実用的なトップの  $\overline{MS}$  質量の測定方法を完成させる。系統誤差の要因とその推定値を可能な限り明らかにする。

(2) この測定に必要な理論計算を行なう。具体的には、トップクォーク崩壊に対する NLO, NNLO の摂動 QCD 補正による効果、及び、トップクォークの offshellness による補正を計算する。また NLO レベルでのシミュレーション解析を行ない、LO の場合と比較する。これらから、摂動 QCD 補正の収束性・予言の安定性を確認する。さらに、トップクォークの各種の相互作用の精密測定にこの方法を応用する。

(3) トップ、ボトム、チャームクォークのクォークのスペクトルを用いて、これらのクォークの  $\overline{MS}$  質量を直接決定する。理論予言のくりこみスケール依存性などを用いた、摂動 QCD の標準的な誤差評価法に基づいて、理論の系統誤差を明快に示すことが可能である。これらの束縛状態の物理的な大きさが典型的なハドロンスケールと比べて有意に小さいため、特に hadronization からく

る不定性が小さく抑えられ、摂動展開の収束性もよい。また高次補正の具体形を用いて、IR リノーマロンから生じる摂動的な不定性を高精度で吟味することが出来る。

#### 4. 研究成果

(1) LHC 実験で粒子の性質を精密測定するための“Weight function method”の確立に向けて発展させた。特にトップクォークの質量決定のための詳細な解析を実行した。

Weight function method による LHC での  $m_t$  決定の LO シミュレーション解析<sup>9</sup>を発表し、トップクォーク  $m_{\bar{S}}$  質量を 1GeV 以下の精度で測定する可能性と必要な工夫を示した。現在は NLO でのシミュレーション解析を引き続き実行し、完了間近である。一方で ATLAS 実験グループと、この方法を用いた  $m_t$  測定の共同研究が進行中である。LHC トップクォーク理論専門家グループは NNLO の fully differential な解析に向けて準備を進めているが、それと Weight function method を組み合わせた  $m_t$  決定に向けて現在実験家と協力している。

(2) 将来のリニアコライダー実験で原理的に 30 MeV 精度で  $m_t$  が測定可能であることを理論的に示した。最近の理論計算の進展を取り入れて 1S エネルギーレベルの再計算を行なった。リノーマロンによって生じる不定性を詳細に検討した結果、naïve なリノーマロン評価を超えて IR の寄与の decoupling が実現されていることが明らかとなり、従来の決定精度よりも向上して、原理的に 20 ~ 30MeV の精度でトップクォークの  $m_{\bar{S}}$  質量を決められることを示した。この結果は共同研究者の清氏により 2015 年のリニアコライダーの国際ワークショップで発表され、注目された。特に Potential-subtracted mass などの間接的な質量定義を使わずに直接  $m_{\bar{S}}$  質量を決定すべきであるという我々の主張が広く認識された。前者の方法を用いると、カットオフの人工的な冪的な依存性を理論予言に持ち込むため、系統誤差が不必要に増大することを我々は示した。

(3) 同じ方法を応用して、ボトムニウムとチャモニウムの 1S スペクトルからボトムとチャムクォークの  $m_{\bar{S}}$  質量を高精度決定した。従来の解析よりも摂動次数を一つ上げ、また vector 1S 束縛状態だけでなく、scalar 1S 状態も用いて  $m_c, m_b$  を抽出した。それぞれ、約  $\pm 20$  MeV の精度で決定した。Particle Data Group (PDG) のこれまでの結果とも consistent な値となり、同時に誤差を PDG 値よりも小さく抑えることに成功した。我々の決定方法は、シンプルで直接的な理論計算に基づき、理論的にクリーンな決定方法となっている。我々のこの結果は、2016 年版 PDG に、 $m_c$  と  $m_b$  の最新の解析結果として採用された。(下図参照。) これを受けて、2017 年 3 月には日本物理学会の招待講演で  $m_c, m_b$  の決定に関する総合報告を行なった。

(4) これまでの私のトップクォークに関する研究業績が認められ、私は 2016 年から PDG のトップクォーク部門担当(encoder) に任命された。各年次ごとに、主に Tevatron と LHC 実験による最新のトップクォークの大量の実験データからトップクォークの諸性質を PDG の Particle Listing 表に掲載するべく、コンパイルを担当している。そして著者としても加わっている。

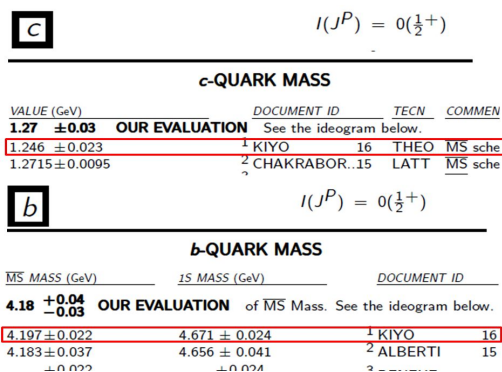


図 1: PDG の  $m_c, m_b$  (2016 年版より抜粋)

#### 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 10 件)

1 “Review of Particle Physics,” Particle Data Group (C. Patrignani, Y. Sumino, et al.). Chin.Phys. C40 (2016) no.10, 100001, p.1-1808, 査読有.  
DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001

2 “On enhanced corrections from quasi-degenerate states to heavy quarkonium observables,” Y. Kiyo, G. Mishima, Y. Sumino, Phys. Lett. B761, p.184-189 (2016), 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2016.08.026

3 “UV contribution and power dependence on QCD of Adler function,” G. Mishima, Y. Sumino, H. Takaura, Phys. Lett. B759, p.550-554 (2016), 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2016.06.010

4 “WW scattering in a radiative electroweak symmetry breaking scenario,” K. Endo, K. Ishiwata, Y. Sumino, Phys. Rev. D94 (2016) no.7, 075007 p.1-17, 査読有.  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.075007

5 “Determination of  $m_c$  and  $m_b$  from quarkonium 1S energy levels in perturbative QCD,” Y. Kiyo, G. Mishima, Y. Sumino, Phys. Lett. B752, p.122-127 (2016), 査読有。

DOI: 10.1016/j.physletb.2015.11.040

6 “Computation of Heavy Quarkonium Spectrum in Perturbative QCD,” Y. Sumino, Proceedings of Loops and Legs 2016, Proceedings of Science, (LL2016) 011, p.1-17, 査読有.  
<https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=260>

7 “Strong IR Cancellation in Heavy Quarkonium and Precise Top Mass Determination,” Y. Kiyo, G. Mishima, Y. Sumino, JHEP, 1511, p.084-1 - 084-19 (2015), 査読有.  
DOI: 10.1007/JHEP11(2015)084

8 “A Scale-invariant Higgs Sector and Structure of the Vacuum,” K. Endo, Y. Sumino, JHEP, 1505, p.030-1 - 030-25 (2015), 査読有.  
DOI: 10.1007/JHEP05(2015)030

9 “Weight function method for precise determination of top quark mass at Large Hadron Collider,” S. Kawabata, Y. Shimizu, Y. Sumino, H. Yokoya, Phys. Lett. B741, p.232-238 (2015), 査読有.  
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.12.044

10 “Full Formula for Heavy Quarkonium Energy Levels at Next-to-next-to-next-to-leading Order,” Y. Kiyo, Y. Sumino, Nucl. Phys. B889, p.156-191 (2014), 査読有.  
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2014.10.010

〔学会発表〕(計 11 件)

1 日本物理学会第 72 回年次大会招待講演 “チャーム及びボトムクォーク質量の精密決定” Y. Sumino, (2017.3.18 大阪府、豊中市、大阪大学) .

2 研究会議 Structures and Interactions of Heavy Quark Hadrons 招待講義 “Understanding Interquark Force and Quark Masses in Perturbative QCD,” Y. Sumino, (2017.3.2-3.3 茨城県、東海村、J-PARC) .

3 KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology 招待講演 “On Higgs Potential Non-analytic at the Origin,” Y. Sumino, (2017.2.17 茨城県、つくば市、KEK) .

4 研究集会 Quarks, Leptons, and Family Gauge Bosons 招待講演 “Family Gauge Symmetry as an Origin of Koide’s Mass Formula and Charged Lepton Spectrum” Y. Sumino, (2016.12.27 大阪府、豊中市、大阪

大学) .

5 Invited talk at Symposium on Precision versus Energy, Present and Future Colliders, “Toward Precision QCD by Factorization of Renormalons: QCD potential and Adler function,” Y. Sumino, (Karlsruhe, Germany, Nov.10, 2016) .

6 ILC 夏の合宿招待講演 “Top Quark and QCD: Current Status and Future Prospect,” Y. Sumino, (2016.7.23-26 岩手県、一関市、いつくし園) .

7 Invited talk at 13th DESY Workshop on Elementary Particle Physics: Loops and Legs in Quantum Field Theory, “Computation of Heavy Quarkonium Spectrum in Perturbative QCD,” Y. Sumino, (Leipzig, Germany, Apr.25, 2016) .

8 IPMU コライダー勉強会 Higher order QCD 招待講演 “A general aspect of perturbative QCD,” Y. Sumino, (2016.2.16 千葉県、柏市、東大 Kavli IPMU 研究所)

9 Invited talk at Quarkonium Workshop 2014, “Subtracting IR ambiguity from the static potential,” Y. Sumino, (Geneva, Switzerland, Nov.12, 2014) .

10 基研研究会「素粒子物理学の進展」招待講演 “A Modern View of Perturbative QCD and Crossings with Mathematics,” Y. Sumino, (2014.7.31 京都府、京都市、京大基礎物理学研究所) .

11 QCD Club 招待講演 “現在の視点から見る摂動 QCD 及び重いクォークonium系への応用,” Y. Sumino, (2014.6.12 東京都、文京区、東大) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

集中講義、於東京大学 “Theory of Non-relativistic Bound States,” Y. Sumino, 2014.8.29-9.2.

集中講義、於名古屋大学 “摂動 QCD に基づくクォーク間力とクォーク質量の理解” Y. Sumino, 2014.10.7-10.9.

集中講義、於新潟大学 “摂動 QCD に基づくク

オーク間力とクォーク質量の理解” Y. Sumino, 2015.12.7-12.9.

講義録 : Lecture note for invited lectures given at Kyoto Univ., etc., “Understanding Interquark Force and Quark Masses in Perturbative QCD,” Y. Sumino, (arXiv:1411.7853 [hep-ph]), 66 pages, 査読無.  
<https://arxiv.org/pdf/1411.7853.pdf>

国際会議 Convener: International Workshop on Future Linear Colliders: LCWS2016 (2016.12.5-9 岩手県、盛岡市、Aina Center & Mallios) .

国際会議組織委員 (副委員長): Key Aspects in Exploring Road to Unification: KAERU Conference (2015.3.25-26 千葉県、柏市、東大 Kavli IPMU 研究所)

長期招聘 : (滞在先) ドイツ、ミュンヘン、ミュンヘン工科大学 2015.10.12-11.13, ホスト研究者 Prof. Nora Brambilla.

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

隅野 行成 (SUMINO, Yukinari)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 80260412