

平成 21 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540267

研究課題名（和文） 量子色力学における高次効果と計算手法の新展開

研究課題名（英文） Higher Order Effects in QCD and the New Development of Computational Method

研究代表者

植松 恒夫 (UEMATSU TSUNEO)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80093194

研究成果の概要：本研究計画では、素粒子の標準模型の中で強い相互作用に対する量子色力学（QCD）の摂動論に基づいて、その高次効果を従来のNLO（Next-to-leading Order）の近似から一歩進めて、NNLO（Next-to-next-to-leading Order）の精度で計算する手法について研究を遂行した。特に QCD の摂動論で計算可能な仮想光子構造関数について世界で初めて NNLO の精度の計算を実行し、同時に標的質量効果ならびに重クォーク質量効果を解析した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	900,000	0	900,000
2007 年度	900,000	270,000	1,170,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	540,000	3,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論，量子色力学，摂動論，高次効果，QCD，光子構造関数，NNLO

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 標準模型の中で強い相互作用に対するゲージ理論である量子色力学(QCD)は漸近的自由性という性質により深非弾性散乱領域言い換えれば短距離においてくりこみ群で改良された摂動論が適用可能である。このことから、くりこみ群のパラメータを高次ループまで摂動で計算すれば、より高い精度の理論計算が可能となる。近年、摂動論的 QCD は 3 ループの異常次元の計算が行われ、従来の NLO の近似より精度の高い NNLO のオーダーまで構造関数の解析が可能となった。この背景には標準模型の確立にとって重要なヒッグス粒子を LHC と呼ばれる加速器（陽子・陽子

コライダー）で発見する際の理論計算の精度の向上という問題が存在する。

(2) 研究代表者らは、これまで特に摂動論的 QCD で計算可能な仮想光子構造関数について NLO の近似で非偏極および偏極の場合に理論的な研究を行ってきた。特に偏極した電子・陽電子同士の衝突で終状態の両者を観測することで偏極仮想光子構造関数  $g_1$  が求められるが、この関数に対する QCD の効果を調べてきた。特に 1 次のモーメントについては、軸性アノマリーとの関連で NLO の精度で QCD 和則として我々の計算結果が得られていた。これを改良するという計画を持っていた。

## 2. 研究の目的

(1) 上記の仮想光子構造関数について摂動論的 QCD の計算の精度を向上させ、NNLO の精度で高次効果を求めることを一つの目標として設定した。さらに、仮想光子から実光子への遷移や標的質量効果、また重クォークの質量効果などを明らかにすることも実験結果と理論の予想を比較検討する際に重要と考えられるので、これらの研究も目的に加えた。

(2) 一方、LHC の領域では、終状態に多数の粒子を発生させる過程が大きなウエイトを占めるようになる。これに関連して、摂動論の計算でスピノル・ヘリシティ形式を用いた多体振幅について開発された計算方法と自己共役 (self-dual) Yang-Mills 場との関連を調べ、計算手法の新たな開発・発展を目指すことを目標として設定した。

## 3. 研究の方法

(1) NNLO 精度での偏極仮想光子構造関数  $g_1$  の 1 次のモーメントの計算には、3 ループのダイアグラムの計算が必要となり、数式処理のプログラムを用いてこれを実行した。またこの QCD 和則は QCD および QED の軸性アノマリーとの関連しており、この解析にはアノマリーに関する Adler-Bardeen の定理を援用する必要があった。この方法で解析的な計算を簡略化することに成功した。

(2) 非偏極の仮想光子構造関数については、最近の研究で求められた 3 ループの異常次元 (パートンの Splitting Function) の結果と 2 ループの係数関数の結果を用い、演算子積展開で登場する光子の場で作られる複合高次スピン演算子の行列要素や係数関数の高次の計算を新たに遂行した。また  $n$ -次のモーメントを逆メラン変換を行って Bjorken 変数  $x$  の関数として求めるにはいくつかの harmonic form と呼ばれる関数の漸近展開の式を計算して、それを複素数の関数空間に持っていくことが必要となる。これらを実行した。

(3) 標的質量効果の計算は、高次スピン演算子の光子状態での期待値のテンソルがトレース・ゼロになる条件から、超幾何関数の特殊な場合である Gegenbauer 多項式が計算の過程で現れ、これについての直交関係および漸化式を用いることで、いわゆる Nachtmann モーメントが導かれる。研究代表者らによってかつて核子の偏極構造関数について求められた場合の手法を駆使し、これに基づいて、標的質量効果を計算し、さらに QCD の高次効果としては NNLO の精度を要求した結果を得た。

## 4. 研究成果

(1) 研究計画の最初の年度は、将来の電子・陽電子リニア・コライダー (ILC) の偏極ビームを用いた実験で測定可能な仮想光子の偏極構造関数について、QCD での高次輻射補正を NNLO のオーダーで求める研究を行った。特に、横浜国大の佐々木賢氏らとの共同研究により、 $g_1$  の 1 次のモーメントに対する NNLO ( $\alpha_s^2$  のオーダー) での QCD 高次効果 (QCD 和則) を求めることに成功した。また、この偏極光子構造関数について、実光子から仮想光子への移り変わりを NLO の近似で調べた。これらについて論文を発表すると共に、2006 年 9 月にオーストリアのオーバーベルツで開催された QCD に関する国際会議で発表した。一方最近、QCD の摂動計算でツイスターとよばれるスピノルを用いた、2 体から  $n$  体へのいわゆる多粒子散乱振幅の計算に関心が持たれている。外線の全てのグルーオンのヘリシティが正の振幅について、自己双対ヤン・ミルズ場を用いて 1 ループの解析を行い、その結果について 2007 年春の物理学会で報告した。

(2) これまで数年間にわたって行ってきた、仮想光子の偏極構造関数に加えて非偏極の構造関数  $F_2$  および  $F_L$  を QCD での高次輻射補正に基づき NNLO のオーダーで求める研究を世界で初めて行った。特に、横浜国大の佐々木賢氏らとの共同研究により、NNLO での QCD 高次効果を計算することに成功した。また、この光子構造関数について、標的仮想光子の質量の効果 NNLO の近似の精度で調べた。これらにつき、論文を発表すると共に、2007 年 10 月にイタリアのフィレンツェにあるガリレオ・ガリレイ理論物理学研究所で開催された「輻射補正に関する国際会議」(RADCOR2007) で発表した。また 2008 年 3 月に開催の日本物理学会で、これらの成果につき、共同研究者から報告した。

(3) 仮想光子の構造関数について、重クォークの質量効果を取り込んだ、QCD での NLO のオーダーでの高次補正を求める研究を行った。また、横浜国大の佐々木賢氏らとの共同研究により NNLO での QCD 高次効果を取り入れた仮想光子中のパートン分布を得ることに成功した。これらにつき論文を発表すると共に、2009 年 9 月にフランスのアヌシーの研究所 (LAPTH) を訪問し、研究室でセミナーを行うと共に、当該分野の研究者と研究討論を行った。また 2009 年 3 月に立教大学で開催の日本物理学会で、これらの成果につき、共同研究者から報告した。以上の研究計画の遂行にあたっては、横浜国大・KEK の研究者との研究交流が有益・不可欠であった。

## 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 13 件)

T. Ueda, K. Sasaki and T. Uematsu, Parton distributions in the virtual photon target up to NNLO in QCD, Eur. Phys. J. C, 査読有, 2009 (掲載決定)

Y. Kitadono, T. Ueda, K. Sasaki and T. Uematsu, Heavy Quark Effects in the Virtual Photon Structure Functions, Prog. Theor. Phys., **121**, 495-510 (2009), 査読有

T. Ueda, K. Sasaki and T. Uematsu, Parton distributions in the virtual photon up to NNLO in QCD and factorization scheme dependence, PoS (RADCOR2007), **036** (2007), 査読無

K. Sasaki, T. Ueda, Y. Kitadono and T. Uematsu, NNLO QCD analysis of the virtual photon structure functions, PoS (RADCOR2007), **035** (2007), 査読無

T. Ueda, T. Uematsu and K. Sasaki, Virtual Photon Structure Functions to NNLO in QCD, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **184** 27-30 (2008), 査読無

Y. Kitadono, K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, Target Mass Corrections for the Virtual Photon Structure Functions to the Next-to-next-to-leading Order in QCD, Phys. Rev. **D77**, 054019 (2008), 査読有

T. Ueda, K. Sasaki and T. Uematsu, Adler-Bardeen theorem for the axial anomaly and the first moment of the polarized virtual photon structure function, AIP Conf. Proc. **915**, 482-485 (2007), 査読無

T. Uematsu, In memoriam: Jiro Kodaira (1951-2006), AIP Conf. Proc. **915**, 94-97 (2007), 査読無

T. Ueda, K. Sasaki and T. Uematsu, The virtual photon structure to the next-to-next-to-leading order in QCD, Phys. Rev. **D75**, 114009 (2008), 査読有

K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, Sum rules of polarized photon structure functions revisited, Acta. Phys. Polon., **B37**, 1103-1109 (2006), 査読無

T. Ueda, T. Uematsu and K. Sasaki, Transition from real to virtual polarized photon structures, Phys. Lett. **B640**, 188-195 (2006), 査読有

T. Ueda, T. Uematsu and K. Sasaki, Sum rules of polarized photon structure functions revisited: NNLO corrections to the first moment of  $g_1(x, Q^2, P^2)$ , Nucl. Phys. Proc. Suppl. **157**, 27-30 (2006), 査読無

K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, The  $s^2$  corrections to the first moment of the polarized virtual photon structure function  $g_1(x, Q^2, P^2)$ , Phys. Rev. **D73**, 094024 (2006), 査読有

[学会発表](計 17 件)

北殿義雄, 仮想光子内のパートン分布に対する重クォーク効果, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月29日, 立教大学, 東京

植松恒夫, Virtual Photon Structure to NNLO in QCD, サボア大学 LAPTH セミナー, アヌシー, フランス

植田高寛, 光子の構造関数と  $R$ -ratio, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 山形大学, 山形

北殿義雄, 仮想光子構造関数における重クォーク効果の繰り込み群的解析, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 山形大学, 山形

植田高寛, Two-photon 過程における構造関数と  $R_2$ -ratio, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学, 東大阪

北殿義雄, 光子構造関数に対する heavy quark effect, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学, 東大阪

植松恒夫, NNLO QCD analysis of the virtual photon structure functions, 第8回輻射補正に関する国際シンポジウム (RADCOR2007), 2007年10月1-5日, フィレンツェ, イタリア

佐々木賢, Parton distributions in the virtual photon up to NNLO in QCD and factorization scheme dependence, 第8回輻射補正に関する国際シンポジウム (RADCOR2007), 2007年10月1-5日, フィレンツェ, イタリア

植松恒夫, Overview of the Spin Structure of the Nucleon, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月22日, 北海道大学, 札幌

植田高寛, NNLOまでのQCD高次補正を取り入れた仮想光子中のパートン分布関数の解析, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学, 札幌

北殿義雄, 仮想光子構造関数のQCDにおけるNNLO及び標的質量効果を含む解析, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学, 札幌

佐々木賢, Virtual Photon Structure Functions to NNLO in QCD, 第17回光子-光子衝突国際ワークショップ (PHOTON2007), 2007年7月9日-13日, パリ

吉田豊, 自己双対Yang-Mills場を用いたグルーオン散乱振幅の解析, 日本物理学会2007年秋季大会, 2007年3月26日, 首都大学東京, 南大沢

植田高寛, 仮想光子構造関数におけるNNLO高次補正の解析, 日本物理学会2007年秋季大会, 2007年3月25日, 首都大学東京, 南大沢

植松恒夫, In memoriam: Jiro Kodaira (1951-2006), 第17回スピン物理国際シンポジウム (SPIN2006), 2006年10月2-7日, 京都

佐々木賢, Adler-Bardeen theorem for the axial anomaly and the first moment of the polarized virtual photon structure function, 第17回スピン物理

国際シンポジウム (SPIN2006), 2006年10月2-7日, 京都

植松恒夫, Axial anomaly and the polarized photon structure, オーバーベルツ・シンポジウム「QCDの成果と展望」, 2006年9月10-15日, オーバーベルツ, オーストリア

〔図書〕(計1件)

藤本潤平, 小平治郎, 植松恒夫 編著, Application of Quantum Field Theory to Phenomenology, Proceedings of the 7th International Symposium on Radiative Corrections, Elsevier, 2006年, 268頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植松 恒夫 (UEMATSU TSUNEO)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 80093194

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者