

# 摂動論的QCDとスピン物理の新展開

(研究課題番号 12640266)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))  
研究成果報告書

平成15年 3 月



研究代表者 植 松 恒 夫

(京都大学総合人間学部教授)

# 摂動論的QCDとスピン物理の新展開

(研究課題番号 12640266)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））

研究成果報告書

平成15年3月

研究代表者 植 松 恒 夫

(京都大学総合人間学部教授)

## 目 次

1. 序
2. 仮想光子の偏極構造関数とスピン依存パートン分布
3. ウィグナー関数とスター積量子化
4. AdS 超対称性の部分的破れと非線形実現
5. 光子構造関数と Positivity Constraints
6. 結び

# 1. 序

本研究計画では、摂動論的QCD（量子色力学）を基礎に、演算子積展開(OPE)や、くりこみ群の方法、また同時にDGLAP型の発展方程式で記述されるQCDパートン描像を用いて、高エネルギーでのスピン物理の新たな展開を目指し研究を遂行した。特に、核子および光子のスピン構造に焦点をあて、その諸側面を解明すべく研究計画を推進した。

核子や仮想光子のスピン構造関数には $g_1$ 、 $g_2$ の2つの構造関数があるが、前者はツイストが2の演算子しか寄与しないのに対し、後者はツイスト2とツイスト3の両方の寄与がある。特にツイスト3は非偏極ではスケーリング極限で現れなかったものであり、スピン偏極がある場合の特徴的な存在である。偏極電子・陽電子衝突で測定可能な偏極した仮想光子のスピンに依存する構造関数を、next-to-leadingオーダーで計算し、光子の偏極構造関数 $g_1^{\gamma}(x, Q^2, P^2)$ を求め、そのQCD和則を論じた。また仮想光子中のクォークおよびグルーオンのスピン依存分布関数を、さまざまなFactorization Schemeの場合にどのような振る舞いをするかを同じく高次のオーダーで求め、そのScheme依存性を解析した。さらに、 $g_2^{\gamma}(x, Q^2, P^2)$ へのツイスト3の効果を摂動論的QCDのLOで、カラーの数 $N_c$ が大きい場合に計算した。

一方、最近の弦理論における非可換幾何学と関連して、ヒルベルト空間、経路積分の手法に次ぐ第3番目の量子化の方法であるWigner関数とスター積(Star Product)を用いたアプローチについて、さらに分析を行い、最も一般的な非対角成分のWigner関数およびそれらのスター積とそれらを生成するgenerating functionsを分析した。

超対称性については、最近広く興味を持たれているAdS/CFT対応に関連して、AdS空間での拡張された超対称性の部分的破れを非線形実現の方法を用いて考察した。特に、2次元の $N=2$ のAdS超対称性が $N=1$ の超対称性に破れる場合を解析した。すなわち、対称性が自発的に破れる際の南部・ゴールドストン(NG)粒子の自由度に関しては、AdS超対称代数 $OSp(2, 2)$ の交換関係を用い、破れた生成子との対応関係を明らかにした。

一方、上述の仮想光子の非偏極および偏極構造関数の満たすべき不等式を、構造関数の正定値正から導き、その関係が実際に満たされるか否かをいくつかの構造関数について、パートン模型とQCDのNLOでの計算結果で調べた。一方、核子の偏極構造関数の場合に分析した標的質量依存性を、演算子積展開およびパートン的手法の両方を用いて仮想光子のスピン構造関数の場合についても調べ、実験データと理論計算の比較検討を行った。

本研究計画は、平成12年度、平成13年度および平成14年度の3年にわたって、文部省科学研究費補助金(基盤研究(C) 課題番号 12640266)の助成を受けて行われた。

## 研究組織

研究代表者： 植 松 恒 夫 (京都大学総合人間学部教授)

## 研究経費

|        |        |
|--------|--------|
| 平成12年度 | 1000千円 |
| 平成13年度 | 800千円  |
| 平成14年度 | 900千円  |
| 計      | 2700千円 |

## 研究発表

### (1) 学会誌等

- [1] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Parton distributions in the virtual photon target and factorization scheme dependence”  
Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) **89** (2000), 162–167.
- [2] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Factorization scheme and parton distributions in the polarized virtual photon target ”  
Eur. Phys. J. C **20** (2001), 283–300.
- [3] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Polarized and unpolarized structures of the virtual photon ”  
Proc. of PHOTON 2000, Ambleside, Lake District, England, 26-31 Aug 2000, AIP Conference Proceedings, **571** (2001) 43–48.
- [4] T. Curtright, T. Uematsu and C. K. Zachos,  
“Generating all Wigner functions”  
J. Math. Phys. **42** (2001) 2396–2415.
- [5] M. Sano and T. Uematsu  
“Nonlinear realization of partially broken  $N = 2$  AdS supersymmetry in two and three dimensions”  
Phys. Lett. B **503** (2001) 413–422.
- [6] K. Sasaki, J. Soffer and T. Uematsu  
“Positivity constraints on photon structure functions”  
Phys. Lett. **B522** (2001), 22–26.
- [7] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Spin structure function of virtual photon and polarized parton distributions”  
Proc. 14th Intern. Spin Physics Symposium (SPIN 2000), Osaka, 16-21 Oct 2000, AIP Conference Proceedings, **570** “Spin 2000”, Osaka (2001) 561–565.

- [8] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
 “Polarized virtual photon structure function  $g_2^\gamma$  and twist-3 effects in QCD”  
 Phys. Rev.**D65** (2002) 114018.
- [9] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
 “Polarized photon structure:  $g_1^\gamma$  and  $g_2^\gamma$ ”  
 Proc. Advanced Study Institute on Symmetries and Spin (PRAHA SPIN 2001),  
 Prague, 15-28 Jul 2001, [arXiv:hep-ph/0205074]  
 Czech Journal of Physics. **52** (2002) C147–C154.
- [10] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
 “Twist-3 effects in polarized photon structure”  
 Proc. 3rd Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (SPIN  
 2001), Beijing, China, 8-13 Oct 2001  
 arXiv:hep-ph/0205086. To appear Int. J. Mod. Phys. A.
- [11] K. Sasaki, J. Soffer and T. Uematsu  
 “Virtual photon structure functions and positivity constraints”  
 Phys. Rev.**D66** (2002) 034014.
- [12] T. Uematsu “Virtual photon structure functions”  
 Proc. RADCOR 2002, Kloster Banz, Germany, 8-13 Sep 2002  
 arXiv:hep-ph/0211090. To appear in Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) Talk at RAD-  
 COR 2002, Kloster Banz, Germany, 8-13 Sep 2002

(2) 口頭発表

1. K. Sasaki and T. Uematsu  
 Parton Distributions in the Virtual Photon Target and Factorization Scheme Dependence, Talk given by K. Sasaki at Zeuthen Workshop on Elementary Particle Theory: Loops and Legs in Quantum Field Theory, 2000年4月9-14日, Koenigstein-Weissig, Germany.
2. T. Uematsu  
 Polarized Virtual Photon Structure in QCD, Talk at the Argonne Theory Seminar, 2000年8月15日.
3. K. Sasaki and T. Uematsu  
 Polarized and Unpolarized Structures of the Virtual Photon, Talk at PHOTON 2000: International Workshop on Structures and Interactions of the Photon, 2000年8月26-31日, Ambleside, England.
4. K. Sasaki and T. Uematsu: Spin Structure Function of the Virtual Photon and Polarized Parton Distributions, Talk given by K. Sasaki at SPIN 2000 2000年10月16-21日, RCNP, Osaka, Japan.

5. H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu: Polarized Photon Structure:  $g_1^\gamma$  and  $g_2^\gamma$ , Talk presented by T. Uematsu at Praha-SPIN-2001, Prague, July 15-28, 2001, to appear in the proceedings.
6. 馬場秀司, 佐々木賢, 植松恒夫: “偏極光子の構造関数と QCD”, 日本物理学会 2001 秋季大会, 一般講演, 2001 年 9 月 25 日, 沖縄国際大学.
7. H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu: Twist-3 Effects in Polarized Photon Structure, Talk presented by T. Uematsu at the 3rd Circum-Pan-Pacific Symposium on "High Energy Spin Physics, Beijing, October 8-13, 2001, to appear in the proceedings.
8. 植松恒夫: “ウィグナー関数と  $\star$  積量子化”, セミナー講演, 2001 年 12 月 21 日, 横浜国立大学工学部.
9. 植松恒夫: “Wigner 関数と star 積量子化”, 特定研究 B 「超対称性と素粒子の統一理論」総括研究集会, 2002 年 2 月 19-21 日, 東京大学山上会館.
10. 佐々木賢, Jacques Soffer, 植松恒夫: “Positivity constraints on photon structure functions”, 日本物理学会第 57 回年次大会, 一般講演, 2002 年 3 月 25 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス.
11. 馬場秀司, 佐々木賢, 植松恒夫: “QCDtwist-3 効果の偏極光子構造関数への寄与”, 日本物理学会第 57 回年次大会, 一般講演, 2002 年 3 月 25 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス.
12. T. Uematsu:  
“Virtual photon structure functions”,  
Talk at RADCOR 2002, Kloster Banz, Germany, 8-13 Sep 2002
13. 馬場秀司, 佐々木賢, 植松恒夫: “仮想光子におけるクォーク相関関数”, 日本物理学会 2002 秋季大会, 一般講演, 2002 年 9 月 15 日, 立教大学池袋キャンパス.

### (3) その他

#### 解説記事:

1. ハドロンの構造と QCD : 最近の話題  
パリティ (丸善出版)、2000 年 12 月号 (Vol.15, No.12)、35 - 40 頁.
2. 物理学における幾何学の量子化 - 量子空間と時空の対称性の量子変形 -  
別冊・数理科学 (サイエンス社) 「現代物理と現代幾何」、2002 年 4 月、176-184 頁

## 2. 仮想光子の偏極構造関数とスピン依存パートン分布

ここ数十年、大型加速器による偏極深非弾性散乱実験の進歩に伴い、核子のスピン構造が実験および理論の両面から精力的に研究されてきた。このきっかけを作ったのは、1987年の CERN における EMC グループの実験結果で、核子のスピンのほんのわずかな割合しか、核子の構成要素であるクォークが担っていないといういわゆる「スピン危機」と呼ばれる現象であった。実験的研究はその後 CERN の SMC グループ、SLAC の E142-5 に引き継がれ、さらに DESY の HERMES グループで精力的な実験が続けられている。また、近い将来 BNL の RHIC Spin Program、CERN の COMPASS、DESY の偏極 HERA で実験が予定されている。この、核子のスピン構造を研究する理論的枠組みは核子を構成するクォークとグルーオンの強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) で、その摂動論的適用には非偏極深非弾性散乱実験のときにはなかった新たな特徴が現れている。

本研究計画では、摂動論的量子色力学を基礎に、演算子積展開 (OPE) やくりこみ群の方法、また DGLAP 型の発展方程式で記述される QCD パートン描像に基づき、核子のスピン構造さらには光子のスピン構造等に関し、理論的取り扱いの手法の開発によって、高エネルギーでのスピン物理の新たな展開を目指し研究計画を推進した。核子のスピン構造関数には  $g_1$ 、 $g_2$  の 2 つの構造関数があるが、前者はツイスト (次元からスピンの大きさを差し引いた値) が 2 の演算子しか寄与しないのに対し、後者はツイスト 2 とツイスト 3 の両方の寄与がある。特にツイスト 3 は非偏極ではスケール極限で現れなかったものであり、スピン偏極がある場合の特徴的な存在である。また一方、ツイスト 3 についてはそのくりこみの手続きがツイスト 2 に比べ、極めて複雑になる。

QCD の摂動論的研究については核子のスピン構造関数の  $Q^2$  依存性やそれに寄与する高次ツイスト演算子の効果とくにツイスト 3 と 4 の演算子のくりこみによる異常次元行列が調べられてきたが、これらの成果を踏まえ、本研究計画では、偏極電子・陽電子散乱での光子のスピン依存構造関数や光子中のパートン分布などについて強力に研究を推進した。特に、横浜国立大学の佐々木賢教授との共同研究において、偏極仮想光子中のクォークおよびグルーオンのスピン依存パートン分布関数を QCD の next-to-leading オーダーで計算し、またその因子化の処方依存性等を調べ、論文として発表した。国外では、2000 年 4 月にドイツで開催された DESY / Zeuthen の会議において発表し、また、さらに同年 8 月にイギリスで開かれた PHOTON2000 で講演した。国内では同年 10 月に大阪大学核物理センターで開かれた国際会議スピン 2000 でも報告した。

さらに、光子のスピン依存構造関数の高次ツイスト、具体的にはツイスト 3 の効果に焦点を当て研究を遂行した。特に仮想光子の場合に登場する  $g_2$  構造関数にツイスト 3 の効果が現れることを、まず QED の Box ダイアグラムで示し、次に純粹に QED の相互作用での演算子展開の分析でこれを明らかにした。これをもとに、QCD の効果を取り入れた場合の  $g_2$  構造関数の 3 次のモーメントを leading-log で厳密に求めた。また color の数が大きい極限での flavor-nonsinglet 成分の  $x$ -依存性を示した。また一方、実 (real) 光子に対する 4 つの構造関数の正定値性から、それらが満たす不等式を導き、論文として発表した。またこれより先に、仮想光子中のクォークおよびグルーオンのスピン依存パートン分布を QCD の next-to-leading オーダーで求め、その処方依存性を調べた。国外の会議では、2001 年 7 月にチェコで開催されたプラハ・スピン 2001 の会議において発表した。また、さらに同年 10 月に北京大学で開かれた spin2001 で講演した。

### 3. ウィグナー関数とスター積量子化

ヒルベルト空間、経路積分の手法に次ぐ第3番目の量子化の方法であるウィグナー (Wigner) 関数とスター積 (Star Product) を用いたアプローチについて、アルゴンヌ国立研究所の C. Zachos 博士およびマイアミ大の T. Cutright 博士と共同で分析を行い、最も一般的な非対角成分の Wigner 関数およびそれらのスター積とそれらを生成する generating functions を分析した。これらの成果に関しては、学術雑誌に掲載し、また横浜国大工学部におけるセミナーと東大理での研究集会において講演した。スター積に関しては、最近弦の場の理論との関係が議論されており、今後の発展が期待される。

### 4. AdS 超対称性の部分的破れと非線形実現

最近広く興味を持たれている AdS/CFT 対応に関連して、AdS 空間での拡張された超対称性の部分的破れを非線形実現の方法を用いて考察した。特に、2次元の  $N=2$  の AdS 超対称性が  $N=1$  の超対称性に破れる場合を解析した。すなわち、対称性が自発的に破れる際の南部・ゴールドストン (NG) 粒子の自由度に関しては、AdS 超対称代数  $OSp(2,2)$  の交換関係を用い、破れた生成子との対応関係を明らかにした。次に、時空の対称性の自発的破れに対する非線形実現の方法を適用して、カルタン微分 1 形式を計算し、共変微分と超行列式を求めることによって、NG 粒子の有効作用を場の 2 次まで求め、その特徴を明らかにした。特に AdS  $N=1$  超対称性の破れのとくと同様に、フェルミオンの場の双 1 次の項が現れることが示された。2次元の結果は 3次元 AdS 超対称性の場合へも容易に拡張可能である。また、4次元 AdS 超対称性の部分的破れについても検討を開始した。

### 5. 光子構造関数と Positivity Constraints

また一方、佐々木賢および J. Soffer の両氏との共同研究で上述の仮想光子の非偏極および偏極構造関数の満たすべき不等式を、実 (real) 光子に対する 4つ (8つ) の構造関数の正定値性から導き、その関係が実際に満たされるか否かをいくつかの構造関数について、パートン模型と QCD の NLO での計算結果と比較検討した。これについては、2002 年 9 月にドイツで開催された RADCOR02 において発表した。また、仮想光子の偏極構造関数の標的質量効果を取り入れた場合につき、演算子積展開およびパートンの手法の両方を用いてその解析を開始した。これについては現在研究が進行中である。

### 6. 結び

以上述べた研究成果は学会誌等に公表されており、詳細については本報告書に収録した論文別刷を参考にして頂きたい。

本研究計画遂行にあたって、科学研究費補助金が大きな助けになったことを報告し、関係各位に感謝の意を表したい。

## 収録論文リスト

- [1] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Parton distributions in the virtual photon target and factorization scheme dependence”  
Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) **89** (2000), 162–167.
- [2] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Factorization scheme and parton distributions in the polarized virtual photon target ”  
Eur. Phys. J. **C 20** (2001), 283–300.
- [3] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Polarized and unpolarized structures of the virtual photon ”  
Proc. of PHOTON 2000, Ambleside, Lake District, England, 26-31 Aug 2000, AIP Conference Proceedings, **571** (2001) 43–48.
- [4] T. Curtright, T. Uematsu and C. K. Zachos,  
“Generating all Wigner functions”  
J. Math. Phys. **42** (2001) 2396–2415.
- [5] M. Sano and T. Uematsu  
“Nonlinear realization of partially broken  $N = 2$  AdS supersymmetry in two and three dimensions”  
Phys. Lett. B **503** (2001) 413–422.
- [6] K. Sasaki, J. Soffer and T. Uematsu  
“Positivity constraints on photon structure functions”  
Phys. Lett. **B522** (2001), 22–26.
- [7] K. Sasaki and T. Uematsu  
“Spin structure function of virtual photon and polarized parton distributions”  
Proc. 14th Intern. Spin Physics Symposium (SPIN 2000), Osaka, 16-21 Oct 2000, AIP Conference Proceedings, **570** “Spin 2000”, Osaka (2001) 561–565.
- [8] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
“Polarized virtual photon structure function  $g_2^\gamma$  and twist-3 effects in QCD”  
Phys. Rev. **D65** (2002) 114018.

- [9] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
 “Polarized photon structure:  $g_1^\gamma$  and  $g_2^\gamma$ ”  
 Proc. Advanced Study Institute on Symmetries and Spin (PRAHA SPIN 2001),  
 Prague, 15-28 Jul 2001, [arXiv:hep-ph/0205074]  
 Czech Journal of Physics. **52** (2002) C147–C154.
  
- [10] H. Baba, K. Sasaki and T. Uematsu  
 “Twist-3 effects in polarized photon structure”  
 Proc. 3rd Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (SPIN  
 2001), Beijing, China, 8-13 Oct 2001  
 arXiv:hep-ph/0205086. To appear Int. J. Mod. Phys. A.
  
- [11] K. Sasaki, J. Soffer and T. Uematsu  
 “Virtual photon structure functions and positivity constraints”  
 Phys. Rev. **D66** (2002) 034014.
  
- [12] T. Uematsu  
 “Virtual photon structure functions”  
 Proc. RADCOR 2002, Kloster Banz, Germany, 8-13 Sep 2002  
 arXiv:hep-ph/0211090. To appear in Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.)