

平成27年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書
〔追跡評価用〕

平成27年 4月15日現在

研究代表者 氏名	岩田 高広	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	山形大学・理学部・教授
研究課題名	大型偏極ターゲットを用いたハドロンのクォーク・グルーオン構造の研究		
課題番号	18002006		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 岩田 高広（山形大学・理学部・教授） 研究分担者 松田 達郎（宮崎大学・工学部・准教授） 研究分担者 吉田 浩司（山形大学・学術情報基盤センター・准教授） 研究協力者 堂下 典弘（山形大学・理学部・助教） 研究協力者 近藤 薫（山形大学・理学部・助教） 研究協力者 石元 茂（KEK 素粒子原子核研究所・講師） 研究協力者 道上 琢磨（山形県高校教諭） 研究協力者 長谷川武雄（宮崎大学・工学部・名誉教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成18年度	44,200 千円
平成19年度	55,000 千円
平成20年度	25,400 千円
平成21年度	17,300 千円
総計	141,900 千円

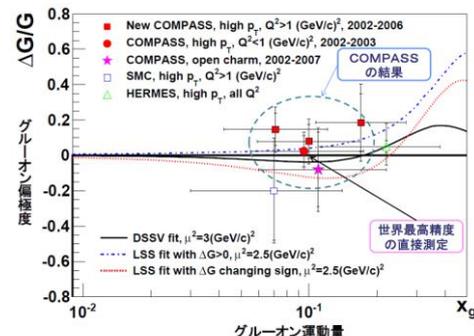
1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

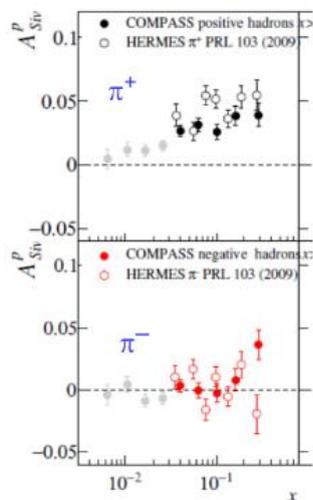
(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

核子は3つのクォーク(陽子: uud、中性子: udd) が軌道角運動量 $L=0$ のS状態で結合した粒子であり、そのスピンはクォークスピンの合成として理解されてきた(クォークモデル)。ところが、QCDによると核子はクォークがグルーオン交換によって結合した粒子で、そのスピンはクォークスピン寄与 $\Delta\Sigma$ 、グルーオンスピン寄与 ΔG 、およびクォークやグルーオンの軌道回転寄与 $\langle L_z \rangle$ に分解される(

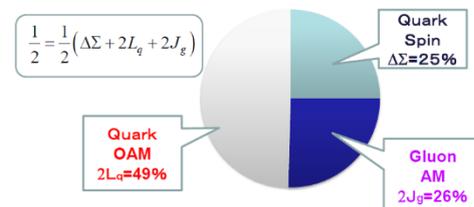


$1/2 = (1/2) \Delta\Sigma + \Delta G + \langle L_z \rangle$)。そして、ナイーブなモデルでは $\Delta\Sigma = 100\%$ となるが、実際は $\Delta\Sigma = 20-25\%$ (PRD 82, 114018 (2010))が得られている。この結果の確定にはCOMPASSが重要な役割を演じてきた。深部非弾性散乱(DIS)に加え、ハドロンを検出するSemi-Inclusive-DIS反応(SI-DIS)の



のスピンの非対称度からフレーバー毎のクォークスピン寄与を求めるなど[COMPASS, PLB 693 (2010) 227など]、様々な情報を得てきた。さらに、グルーオン偏極度の最高精度での測定を実現し[COMPASS, PLB 633 (2006) 25](右上図参照)、オープン・チャーム過程で唯一のデータを提供した[COMPASS, PLB 676 (2009) 31, PRD 87 (2013) 052018]。その結果、0と矛盾しないグルーオン偏極度が見い出された。これらや米国でのRHIC-spin実験から ΔG の絶対値は0.3程度にとどまる可能性が高まっている。そのため、最後に残った軌道回転寄与に注目が集まっている。この探究にはクォーク横運動量に依存したパートン分布(TMD-PDF)の重要性が指摘されている。中でもSivers関数は核子スピンとクォーク横運動量(核子スピンに垂直)との相関を表し、それが0でないことは軌道回転寄与の存在の証拠と見られる。この関数はハドロンの方位角と核子スピンの相関の非対称(Sivers非対称度)から決定される。HERMESが陽子に対して「 π^+ でnon-zeroのSivers非対称度」を見出した[HERMES, PRL 103 (2009), 左図参照]が、COMPASSもこれを確認した[COMPASS, PLB 717(2012) 383]。一方「 π^- の非対称度が小さい」ことも示され、フレーバー依存性も存在することも分かってきた

[COMPASS, PRL.94:202002,2005]。一方で、格子QCDでもスピン分解が行われ(右図、 χ QCD, KITOC-July 17, 2012)、その多くがクォーク軌道回転(OAM)の重要性を指摘している。現在、COMPASSでは第二次計画(COMPASS phase II)として偏極陽子標的での π^- 入射ドレムラン反応のスピン依存性を調べ、ドレムラン反応でのSivers関数を初めて決めるべく準備を進めている(H27年度にデータ収集)。さらに、最近、核子の形状因子とクォーク分布を統一的に拡張した一般化パートン分布GPDが核子の構造解明の鍵として注目されているが、COMPASSでも大型水素標的に偏極ミュオンビームを入射し、深部仮想コンプトン散乱過程を調べることで、GPDの情報を得る測定をH28,H29年度に計画している。



1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

“**Experimental study with lepton scattering.**” T.Iwata (invited talk), " Symposium on Latest results and future programs on the nucleon structure -Toward an understanding of the nucleon spin -" in JPS meeting, March 27-30, 2014, Hiratsuka, Japan

“**Nucleon Structure Overview**” T.Iwata (invited talk), Xth Quark Confinement and the Hadron Spectrum、 Oct. 10-14, 2012 in Munick, Germany

”**Recent COMPASS results on transverse spin asymmetries in SIDIS**”,

※T.Iwata on behalf of COMPASS, Joint Meeting of the APS and the JPS, 2014, Oct. 7-11, Hawaii

”**Hadron Spectroscopy in COMPASS**” T.Iwata (invited talk), New Frontier in QCD, Kyoto, 2010

“**Recent COMPASS Results on Transvere Physics**” T.Iwata (invited talk), 8th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics: June 20-24, 2011 in Cairns, QLD, Australia

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

① 科学研究費助成事業（代表者：岩田高広）

研究種目：基盤研究(A)

研究課題：CERN-COMPASSでの核子スピンのQCD構造の研究

研究期間：平成26年～平成29年

研究経費：3,150万円(直接経費)

② 科研費以外の研究費（代表者：岩田高広）

研究種目：頭脳循環を活性化する若手研究者海外派遣プログラム

研究課題：大型固定ターゲットによる核子スピンのクォーク・グルーオン構造の研究

研究期間：平成22年～平成24年

研究経費：5,619万円(直接経費)

山形大学 YU-COE(S) (大学内研究支援予算)

研究課題：総合スピン科学

研究期間：平成21年～平成26年

研究経費：8,000万円

山形大学総合スピン科学創成プロジェクト経費

研究期間：平成23年～平成27年

研究経費：約1億8,000万円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

この特別推進研究の重要な研究成果として以下の3つを特筆することができる。

(1) ビーム軸に沿った縦偏極ミュオンと同じく縦偏極陽子および重陽子による深部非弾性散乱(DIS)においてハドロン粒子識別を行い(SI-DIS=Semi-Inclusive DIS 反応を検出)、縦方向2重スピン非対称度の測定によって、クォークの偏極分布関数のフレーバー分解、バレンス・シー分解に関する直接的な情報が得られた。陽子ではバレンスの u-quark が正偏極、バレンスの d-quark が負偏極、その他 sea-quark はほとんど偏極していないことがわかった。

(2) グルーオン偏極に敏感な photon-gluon 融合反応を high-Pt ハドロン対生成、およびオープンチャーム過程でとらえ、それらの反応に関する縦方向2重スピン非対称度を得ることでグルーオン偏極度をこれまでの最高精度で得た。他のグループ(SMC, HERMES)も含めこれまでの解析はすべてリーディングオーダーで行われていたが、COMPASSのオープンチャームのデータは初めてネクスト・リーディング・オーダーで解析された。その結果、グルーオンの x-Bjorken が 0.1 付近ではグルーオン偏極度が0と矛盾しない結論が得られた。少なくとも、グルーオンスピン寄与 ΔG の絶対値が0.3を超えないと考えられる。

(3) HERMES グループが最初に見いだした陽子標的での π^+ 中間子生成に関する Sivers 非対称度が0でないことを COMPASS でもより高エネルギーでより広い運動学的領域において確認した。この非対称度は陽子内の u-quark の横運動量と陽子スピンの相関を持つことを表し、u-quark の軌道回転の存在を示唆するものである。また、COMPASS で重陽子偏極標的では非対称度が0と矛盾しないことを見いだしていることなどから、d-quark は u-quark と逆方向の軌道回転に寄与していることが予想される。このような軌道回転の存在はクォークモデルでの核子描像とは一線を画する知見である。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

東北大学電子光物理学研究センター 運営協議会委員、2010-2011、2015-2016、
原子核素粒子分野での全国共同研究拠点の一つである電子光物理学研究センターの運営に貢献した。

International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy, Lisbon, 16-18 April 2012,
International Advisory Committee member

ハドロンの構造とその分光学的研究に関する国際会議の招待講演の選定などに貢献した。

9th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, 2014, Oct 28-31, Ji'nan, China,
International Advisory Committee member

高エネルギースピンの物理学に関する国際会議の招待講演の選定などに貢献した。

International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy, Suzdal, Russia, 2015, 18-20 May,
International Advisory Committee member

ハドロンの構造とその分光学的研究に関する国際会議の招待講演の選定などに貢献した。

10th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, 2015, Oct 5-8, Taipei, Taiwan,
International Advisory Committee member

高エネルギースピンの物理学に関する国際会議の招待講演の選定などに貢献した。

日本学術振興会、専門研究員、2013-2015、

日本学術振興会の科学研究費補助金などの研究費配分のシステムに関する研究などを行った。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	The Compass Experiment at CERN. COMPASS Collaboration, P. Abbon,...,et al., (204authors). <i>Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A 577 (2007) 455-518</i>	CERN での COMPASS 実験装置に関する構造の詳細や性能を示すデータが記述されている。	241
2	new measurement of the Collins and Sivers asymmetries on a transversely polarised deuteron target. COMPASS Collaboration, S. Ageev,...,et al., (258authors), <i>Nucl. Phys. B 765 (2007) 31-70</i>	ビーム軸に垂直に偏極させた横偏極重陽子標的に 160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた場合の、標的スピンとハドロンの方位角相関に関する非対称度であるコリンズ、シバース非対称度に関する新たなデータが示されている。	175
3	The Deuteron Spin-dependent Structure Function g1d and its First Moment. COMPASS Collaboration, V.Yu. Alexakhin,...,et al., (228authors), <i>Phys. Lett. B 647 (2007) 8-17</i>	ビーム軸に沿って偏極された縦偏極重陽子標的に 160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンをとらえた時のスピン非対称度から得られる重陽子のスピン構造関数 g1d とその第一モーメントのデータが示されている。	169
4	Collins and Sivers asymmetries for pions and kaons in muon-deuteron DIS COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (240authors), <i>Phys. Lett. B 673 (2009) 127-135</i>	ビーム軸に垂直に偏極させた横偏極重陽子標的に 160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンと π や K などのハドロンを粒子識別してとらえた場合の標的スピンとハドロン方位角相関に関する非対称度であるコリンズ、シバース非対称度に関するデータが示されている。	124
5	The Polarised Valence Quark Distribution from semi-inclusive DIS. COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (210authors), <i>Phys. Lett. B 660 (2008) 458-465</i>	ビーム軸に沿った方向に偏極させた縦偏極重陽子標的に 160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた時の縦方向スピン非対称度から核子内のバレンスクォークの偏極クォーク分布を決定している。	66
6	Flavour Separation of Helicity Distributions from Deep Inelastic Muon-Deuteron Scattering. COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (205authors), <i>Phys. Lett. B 680 (2009) 217-224</i>	ビーム軸に沿って偏極させた縦偏極陽子や重陽子標的に 160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンやハドロンをとらえた時のスピン非対称度から核子内でのクォーク、反クォークの偏極分布を Bjorken-x の関数として決定している。	42
7	Spin asymmetry A1d and the spin-dependent structure function g1d of the deuteron at low values of x and Q2. COMPASS Collaboration, V.Yu. Alexakhin,...,et al., (231authors). <i>Phys. Lett. B 647 (2007) 330-340</i>	ビーム軸に沿った方向に偏極させた縦偏極重陽子標的に 160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンをとらえた時の縦方向スピン非対称度 A1d を低い値の Bjorken-x、低い値の Q2 で行って出したスピン依存構造関数 g1d の値を求めている。	21
8			
9			
10			

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Measurement of the Collins and Sivers asymmetries on transversely polarised protons. COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (205 authors), <i>Phys. Lett. B 692 (2010) 240–246</i>	ビーム軸に垂直に偏極させた横偏極陽子標的に160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた場合の標的スピンとハドロンの方位角相関に関する非対称度であるコリンズ、シバース非対称度に関するデータが示されている。	8 4
2	The spin-dependent structure function of the proton g_{1p} and a Test of the Bjorken Sum Rule. COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (205 authors), <i>Phys. Lett. B 690 (2010) 466–472</i>	ビーム軸に沿って偏極させた縦偏極陽子標的に160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンをとらえた時のスピン非対称度から陽子に対するスピン構造関数 g_{1p} を求め、これまでの重陽子に対する g_{1d} のデータから Bjorken 和則の最高精度での検証を行っている。	5 2
3	Experimental investigation of transverse spin asymmetries in muon-p SIDIS processes: Sivers asymmetries. COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (218 authors), <i>Phys. Lett. B 717 (2012) 383–389</i>	ビーム軸に垂直に偏極された横偏極陽子標的に160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた場合の、標的スピンとハドロンの方位角相関に関する非対称度であるシバース非対称度に関するデータが示されている。	3 4
4	Experimental investigation of transverse spin asymmetries in muon-p SIDIS processes: Collins asymmetries. COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (218 authors), <i>Phys. Lett. B 717 (2012) 376–382</i>	横偏極陽子標的に160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた場合の、光子に叩かれた後のクォークのスピンとハドロンの方位角相関に関するコリンズ非対称度のデータが示されている。	3 1
5	Transverse spin effects in hadron-pair production from semi-inclusive deep inelastic scattering. COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (199 authors), <i>Phys. Lett. B 713 (2012) 10–16</i>	横偏極陽子標的に160GeV ミューオンを入射し、散乱ミューオンと2つのハドロン対をとらえた場合の、光子に叩かれた後のクォークのスピンとハドロンの方位角相関に関する非対称度のデータが示されている。	1 2
6	Azimuthal asymmetries of charged hadrons produced by high energy muons off longitudinally polarized deuterons. COMPASS Collaboration, M.G.Alekseev,...,et al., (218 authors), <i>Eur. Phys. J. C (2010) 70: 39–49</i>	横偏極陽子標的に160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンをとらえた場合の、陽子スピンとハドロンの方位角相関に関する非対称度のデータが示されている。	1 2
7	Leading order determination of the gluon polarisation from DIS events with high-pT hadron pairs. COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (216 authors), <i>Phys. Lett. B 718 (2013) 922–930</i>	ビーム軸に沿って偏極させた縦偏極陽子および重陽子標的に160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、散乱ミューオンと高い横運動量を持つ2つのハドロン対を検出した場合のスピン非対称度から核子中でのグルーオンの偏極度をリーディングオーダーでの解析で求めている。	9
8	Exclusive ρ^0 muoproduction on transversely polarised protons and deuterons COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (220 authors), <i>Nucl. Phys. B 865 (2012) 1–20</i>	横偏極陽子標的に160GeV のミューオンを入射し、散乱ミューオンと ρ 中間子を検出し、終状態 $\mu+p \rightarrow \mu' + p + \rho$ 反応を排他的に確認した場合の、陽子スピンと ρ 中間子の方位角相関に関する非対称度のデータが示されている。	9
9	Leading and Next-to-Leading Order Gluon Polarisation in the Nucleon and Longitudinal Double Spin Asymmetries from Open Charm Muoproduction. COMPASS Collaboration, C.Adolph,...,et al., (221 authors), <i>Phys. Rev. D 87, 052018 (2013)</i>	ビーム軸に沿って偏極させた縦偏極陽子および重陽子標的に160GeV の縦偏極ミューオンを入射し、オープンチャーム事象に関するスピン非対称度から核子中でのグルーオンの偏極度をリーディングオーダーおよびネクスト・リーディングオーダーでの解析で求めている。	8
10	Hadron transverse momentum distributions in muon deep inelastic scattering at 160 GeV/c. COMPASS Collaboration, C. Adolph,..., et al., (168 authors), <i>Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2531.</i>	核子内クォークの横運動量分布を推定するために、陽子標的に160GeV のミューオンを入射し、散乱ミューオンとハドロンを捕らえる Semi-Inclusive DIS 反応において、ハドロンの横運動量分布を求めている。	5

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本研究にかかわった2名の若手研究者、堂下典弘と近藤薫は COMPASS の中核メンバーとして活躍するようになった。両名ともに共同研究の最高意志決定機関であるコラボレーション・ボードのメンバーに選出され、共同研究の中で重要な役割を担っている。また、両名は国際会議等の運営にもかかわっている。堂下は COMPASS 水素標的のコンタクト・パーソンに抜擢され、次期計画 COMPASS-II の要の一つである CFRP を用いた大型水素標的の開発の責任者として開発を成功させた。

以下に両名の具体的な研究実績を示す。

堂下典弘、山形大学助教

研究業績

A 2.5m long liquid hydrogen target for COMPASS. E. Bielert,... , N. Doshita, ..., S. Ishimoto, T. Iwata, K. Kondo, G.K. Mallot, H. Matsuda , T. Matsuda, Y. Miyachi, G. Nukazuka, ..., H. Suzuki,...et.al, (18 authors), *Nucl.Instrum.Meth. A746 (2014) 20-25*: **Indirect detection of nitrogen spins in ammonia target at superlow temperatures.** Yu.Kiselev, N.Doshita, F.Gautheron, K.Kondo, W.Meyer. *Nucl.Instrum.Meth. A711 (2013) 8-11*: **The COMPASS polarized target in 2006 and 2007.** N.Doshita,...,K.Kondo,..., et al.,(21 authors), *AIP Conf.Proc. 980 (2008) 307-311* : **On the large COMPASS polarized deuteron target.** J. Ball, ...,N. Doshita, ...,K. Kondo, W. Meyer, ...,T. Matsuda..., T. Iwata (23 authors), *Czech.J.Phys. 56 (2006) F295-F305*

国際会議発表等

”An overview of target polarisation techniques”,N.Doshita, AFTER@LHC week workshop, 17-21, Nov. 2014, (invited talk),“COMPASS-II: COMPASS Future Programs” N.Doshita on behalf of COMPASS,8th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics], June 20-24, 2011 in Cairns, QLD, Australia: “The COMPASS polarized target in 2006 and 2007” 12th International Workshop on Polarized Sources and Targets (PST 2007) 10-14 Sep 2007. Upton, New York: “Performance of the COMPASS polarized target dilution refrigerator.” Polarized solid targets and techniques. Proceedings, 9th International Workshop, Bad Honnef, Germany, October 27-29, 2003

学協会における役職等;

PACSPIN07 – 7th Circum Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, Yamagata, Japan, September 15-18, 2009, local organizing committee member: COMPASS Collaboration board member 2012-, Contact person of COMPASS Liquid Hydrogen Target

近藤薫、山形大学 助教

研究業績

A 2.5m long liquid hydrogen target for COMPASS. E. Bielert,... , N. Doshita, ..., S. Ishimoto, T. Iwata, K. Kondo, G.K. Mallot, H. Matsuda , T. Matsuda, Y. Miyachi, G. Nukazuka, ..., H. Suzuki,...et.al, (18 authors), *Nucl.Instrum.Meth. A746 (2014) 20-25*: **Indirect detection of nitrogen spins in ammonia target at superlow temperatures.** Yu.Kiselev, N.Doshita, F.Gautheron, K.Kondo, W.Meyer. *Nucl.Instrum.Meth. A711 (2013) 8-11*: **The COMPASS polarized target in 2006 and 2007.** N.Doshita,...,K.Kondo,..., et al.,(21 authors), *AIP Conf.Proc. 980 (2008) 307-311* : **On the large COMPASS polarized deuteron target.** J. Ball, ...,N. Doshita, ...,K. Kondo, W. Meyer, ...,T. Matsuda..., T. Iwata (23 authors), *Czech.J.Phys. 56 (2006) F295-F305*

国際会議発表等

“Study of spin structure of nucleon in COMPASS - measurement of Delta_G/G to study gluon spin contribution -“, Kaori KONDO on behalf of COMPASS, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities, October 29 - November 3, 2006:

学協会における役職等;

PACSPIN07 – 7th Circum Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, Yamagata, Japan, September 15-18, 2009, local organizing committee member:

COMPASS Collaboration board member 2012-, 核子構造ワーキンググループメンバー