

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22244022  
 研究課題名（和文） 超高エネルギーハドロン衝突からの光子測定を可能とする電磁カロリメータの開発  
 研究課題名（英文） Development of electro-magnetic calorimeter for photon measurements in ultra-relativistic hadron collisions  
 研究代表者  
 濱垣 秀樹（HAMAGAKI HIDEKI）  
 東京大学・大学院理学系研究科・教授  
 研究者番号：90114610

研究成果の概要（和文）：小さな  $x$  領域 ( $x < 0.01$ ) でのグルーオンの分布関数を調べるため、CERN LHC で  $p+p$ 、 $p+Pb$  衝突において前方 ( $\eta = 3 \sim 5$ ) に放出される単光子、中性パイ中間子測定に最適化したトラッキング型電磁カロリメータのプロトタイプを開発した。シリコンからの信号読み出しには専用の ASIC を設計・製作した。プロトタイプは、CERN PS 加速器からの二次ビームを用いて性能評価をおこない、所定の性能を持つことを確認した。

研究成果の概要（英文）：A prototype of tracking electro-magnetic calorimeter was developed, which is optimized to measure single photons and neutral pions at forward rapidity region in  $p-p$  and  $p-A$  collisions at CERN LHC with purpose of investigating gluon distribution function at small  $x$  region. An ASIC chip for reading signals from Si sensor was designed and fabricated. The detector prototype was tested using the secondary beams at CERN PS and performances were evaluated.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	23,800,000	7,140,000	30,940,000
2011年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2012年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

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：原子核（実験）

## 1. 研究開始当初の背景

申請者らは、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) RHIC PHENIX 実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) を実現し、その性質を探ることを目的に、高エネルギー重イオン衝突実験を推進してきた。金+金中心衝突で生成される火の玉が  $\eta/s$  (粘性/エントロピー密度) の極めて小さい流体として振る舞うことが見出され、大きな注目を集めた。通常物質に見られる  $\eta/s$  が相

転移近傍で極小となることとの関連性が着目されており、より高いエネルギーでの衝突により実現される高温での振る舞いを調べることが、LHC での重イオン衝突実験を進める大きな動機付けとなっている。

衝突初期については平衡化過程等未解決な問題も多い。LHC においては、RHIC と比べてより大きな不定性があることが解ってきた。高エネルギーハドロン衝突は、ストリング模型に代表される非摂動的ソフト過程

と、パートン描像が成り立つ摂動的ハード過程とから成るが、LHC ではハード過程が支配的となり、初期状態形成への大きな寄与が予想される。LHC で主役となるのは  $x \sim [1/s(\text{GeV})]^{1/2} \sim 10^{-3} - 10^{-4}$  のグルーオンであるが、そのパートン分布関数 (PDF) に大きな不定性がある。

陽子の PDF は HERA において  $(x, Q^2)$  の広い範囲で調べられた。  $x$  の減少とともに増加するが、(小  $x$ , 小  $Q^2$ ) では誤差が大きい。陽子の gPDF (グルーオンの PDF) をもとに計算された鉛原子核の gPDF と陽子の gPDF の比は、(小  $Q^2$ ,  $x < 10^{-2}$ ) の領域で非常に大きな不定性を持ち、その程度はバレンスクォーク (V)、シークォーク (S) と比較しても甚だしい。直接測定が必要な所以である。

小さな  $x$  領域の gPDF は QCD 理論的にもホットな話題である。ある  $Q^2$  でのグルーオン密度は  $x$  の減少とともに増大するが、やがてグルーオン融合との競合により飽和指標  $Q_s(x)^2$  で飽和し、カラーグラス凝縮 (CGC) で記述される状態が実現すると考えられる。原子核の場合には、複数核子からの寄与により、同じ  $Q^2$  で比較すると、核子の場合より大きな  $x$  で飽和する。LHC の既存の検出器がカバーする  $(x, Q^2)$  領域だけからは、グルーオン飽和に関する新たな知見は期待できない。

## 2. 研究の目的

グルーオン飽和を研究する為には、 $x \sim 5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$ 、 $Q^2 \sim 1 - 100 (\text{GeV}/c)^2$  の領域で、グルーオンが関与するハード過程を調べるのが良い。その為には、LHC の陽子+陽子、陽子+鉛衝突において、前方 ( $\eta \sim 2.5 - 4.5$ ) での単光子、及び中性  $\pi$  中間子の生成断面積測定が有望である。そうすることで、グルーオン飽和過程を明らかにし、カラーグラス凝縮 (CGC) を実験的に検証することが最終的な目標であるが、前方での単光子、及び中性  $\pi$  中間子測定を可能とする新しいタイプの電磁カロリメータを開発し、性能評価をおこなうのが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

小さな  $x$  領域での陽子及び重い原子核 (鉛) についてのグルーオン分布関数を精度良く求めることを最終目的とし、その目的の為に必要とされる前方 rapidity で高運動量  $\pi$  中間子、高運動量単光子の生成断面積の測定を可能とするトラッキング電磁カロリメータを開発する。

すでに着手しているシミュレーション結果を基に、電磁カロリメータの仕様を決定し、プロトタイプ開発を開始する。本体の開発と並行して、信号読み出し用の ASIC の設計・製作を進め、その性能評価を行なう。最後に、

プロトタイプを完成させ、加速器からのビームを用いて、総合的な評価をおこなう。

## 4. 研究成果

平成 22 年度は、以下の項目について進めた。

(1) 直接光子とジェット起源の中性  $\pi$  中間子の測定について PYTHIA を用いたシミュレーションを用いて考察を進めた。(2) 電磁カロリメータへの要求仕様 (擬 rapidity 範囲: 2.5-4.5、運動量範囲: 1 GeV/c-200 GeV/c、二光子分離能: 0.6 cm、多重粒子分離能: 0.1/cm<sup>2</sup>) の妥当性を、事象シミュレーションを用いて検証した。(3) 要求仕様に合う検出器の概念設計を進めた。(4) プロトタイプ (メカニカル部) について、シリコンパッド型検出器とストリップ型検出器の購入、検出器要素組み立て用治具の製作、タングステン板の製作をおこなった。(5) プロトタイプ (読み出し部) について、ASIC 読み出し回路の設計・試作をおこない、その結果に基づいて ASIC 読み出し回路 (第 2 版) の設計をすすめた。

平成 23 年度は以下に項目について実施した。(1) プロトタイプ機 (メカニカル部) の全体構造設計を完成させ、エネルギー測定要素 (タングステン、シリコン、フレキ等から成るエネルギー測定の最小基本構成要素) の製作をおこなった。更に、信号読み出し基板を設計・製作し、プロトタイプ 1 号機の組み立てまで漕ぎ着けた (図 1 参照)。(2) 読



図 1 : プロトタイプ 1 号機組み立て途中

み出し回路系については、昨年度試作したシリコンからの信号の読み出し回路 ASIC (プリアンプ+シェイパー) を載せた通称プリアンプボードを設計・製作し、後段読み出し回路の設計・製作をおこなった。(3) CERN の PS 及び SPS 加速器から得られる二次ビームを用いて、プロトタイプ機の性能評価をおこなった。

平成 24 年度は研究の最終年度に当たるが、以下のような研究を進めた。(1) プロトタイプ機 (メカニカル部) の各シリコンエネルギー測定要素の性能確認をおこない、シリコンから信号取り出し部迄の信号伝達系の

性能評価、最終調整を遂行した。(2) 読み出し回路系の建設: シリコンからの信号の読み出し回路 ASIC(プリアンプ+シェイパー)の評価を実施し、ASICを載せた読み出しボードを設計・製作した。(3) プロトタイプの総合的な性能評価を実施した。結果の1例を図2に示す。

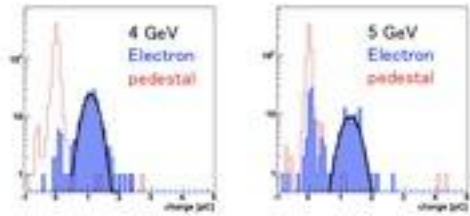


図2: 電子入射に対するレスポンス

## 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 12 件)

- ① B. Abelev, T. Gunji, H. Hamagaki 他 (ALICE Collaboration): Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV; Phys. Lett. B719 (2013) 29-41, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.012
- ② B. Abelev, T. Gunji, H. Hamagaki 他 (ALICE Collaboration): Transverse Momentum Distribution and Nuclear Modification Factor of Charged Particles in p-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV; Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 82302, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.082302
- ③ Hideki Hamagaki: High Energy Density QCD; Prog. Theor. Phys. Suppl. 193 (2012) 79-88, 査読無, DOI: 10.1143/PTPS.193.79
- ④ Taku Gunji: Heavy quark and quarkonium productions in high energy nucleus-nucleus collisions at RHIC and LHC; Prog. Theor. Phys. Suppl. 187 (2011) 78-86, 査読無, DOI: 10.1143/PTPS.187.78
- ⑤ Y. Hori, H. Hamagaki, T. Gunji: Simulation study for forward calorimeter in LHC-ALICE experiment; J. Phys. Conf. Ser. 293 (2011) 012029, 査読無, DOI: 10.1088/1742-6596/293/1/012029
- ⑥ Hideki Hamagaki: First results from the ALICE experiment at LHC; Prog. Theor. Phys. Suppl. 187 (2011) 237-249, 査読無, DOI: 10.1143/PTPS.187.237
- ⑦ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration): Suppression of away-side jet fragments with respect to the

reaction plane in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV; Phys. Rev. C 84 (2011) 024904, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.84.024904

- ⑧ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration): Cold Nuclear Matter Effects on  $J/\psi$  Yields as a Function of Rapidity and Nuclear Geometry in Deuteron-Gold Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV; Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 142301, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.142301
- ⑨ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration): Suppression of back-to-back hadron pairs at forward rapidity in d+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV; Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 172301, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.172301
- ⑩ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration):  $J/\psi$  suppression at forward rapidity in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV; Phys. Rev. C 84 (2011) 054912, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.84.054912
- ⑪ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration): Trends in Yield and Azimuthal Shape Modification in Dihadron Correlations in Relativistic Heavy Ion Collisions; Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 252301, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.252301
- ⑫ A. Adare, T. Gunji, H. Hamagaki et al. (PHENIX Collaboration): High  $p_T$  direct photon and  $\pi^0$  triggered azimuth jet correlations and measurement of  $k_T$  for isolated direct photons in p+p collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV; Phys. Rev. D 82 (2010) 072001, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.82.072001

[学会発表] (計 19 件)

- ① 林真一、浜垣秀樹、郡司卓、田中真伸、池田博一: LHC-ALICEにおける前方方向カロリメータ用読み出しASICの性能評価; 日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日-29日、広島大学
- ② Hideki Hamagaki: Forward Upgrade - - Plan in the ALICE experiment at LHC; Nagoya University GCOE International Workshop 2013; High-Energy Scattering at Zero Degree(招待講演), 2013/03/02 ~ 2013/03/04, Nagoya University
- ③ Taku Gunji: Future Perspectives of the ALICE Experiment and ALICE detector upgrades; The 4th Asian Triangle Heavy Ion conference (ATHIC2012), 2012/11/14 ~ 2012/11/17, Grand Hotel, Pusan, South Korea

- ④ S. Hayashi, H. Hamagaki, T. Gunji, M. Tanaka, H. Ikeda: Development of a Wide-Dynamic Range Front-End ASIC for the W+Si Sampling Calorimeter; IEEE 2012 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2012/10/29 ~ 2012/11/03, Disneyland Hotel, Anaheim, California, USA
- ⑤ 林真一, 浜垣秀樹, 郡司卓, 田中真伸, 池田博一, 黒川明子, 片寄祐作: LHC-ALICE 実験における前方方向カロリメータのための読み出し用 ASIC の開発; 日本物理学会第 67 回年次大会、2012/3/24 - 27、関西学院大学
- ⑥ H. Hamagaki: High Energy Density QCD - experimental overview -; XLI International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD2011), 2011/9/29, Miyajima, Hiroshima
- ⑦ 林真一, 浜垣秀樹, 郡司卓, 田中真伸, 黒川明子, 片寄祐作, 池田博一: LHC-ALICE 実験における W+Si カロリメータの読み出し用 ASIC の開発; 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/9/16 - 19、弘前大学文京町キャンパス
- ⑧ 辻智也, 浜垣秀樹, 郡司卓, 堀泰斗: シミュレーションを用いた LHC-ALICE 実験用前方カロリメータの性能評価; 日本物理学会第 66 回年次大会 (中止)、2011/3/25 - 28、新潟大学
- ⑨ 林真一, 浜垣秀樹, 郡司卓, 田中真伸, 黒川明子: Si+W カロリメータ用読み出し ASIC の開発; 日本物理学会第 66 回年次大会 (中止)、2011/3/25-28、新潟大学
- ⑩ 黒川明子, 馬場秀忠, 郡司卓, 浜垣秀樹, 林真一, 本林透, 村上浩之, 竹谷篤, 田中真伸, 梶野泰宏, 米田健一郎: 広いダイナミックレンジを持った電荷有感型前置増幅器の開発; 日本物理学会第 66 回年次大会 (中止)、2011/3/25-28、新潟大学
- ⑪ H. Hamagaki: Status of ALICE FOCAL project; The workshop for ALICE upgrade by Asian countries, 2011/3/7 - 8, Yonsei University, Korea
- ⑫ T. Gunji: Current status and plan of ALICE FOCAL project; The workshop for ALICE upgrade by Asian countries, 2011/3/7 - 8, Yonsei University, Korea
- ⑬ T. Tsuji: Simulation study of ALICE FOCAL; The workshop for ALICE upgrade by Asian countries, 2011/3/7 - 8, Yonsei University, Korea
- ⑭ S. Hayashi: ASIC development for ALICE FOCAL readout; The workshop for ALICE upgrade by Asian countries, 2011/3/7 - 8, Yonsei University, Korea
- ⑮ T. Gunji: W+Si Forward tracking calorimeter

- for the ALICE upgrade; PHENIX decadal plan workshop, 2010/12/14 - 16, BNL, USA
- ⑯ 郡司卓: 今後の見通しと実験増強計画; 理論核物理領域合同シンポジウム「LHC 加速器 ALICE 実験によるハドロン物理の幕開け」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/11 - 14、九州工業大学
- ⑰ 辻智也, 浜垣秀樹, 郡司卓, 堀泰斗: LHC-ALICE 実験のアップグレードに向けた前方カロリメータの研究; 日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/11 - 14、九州工業大学
- ⑱ Hideki Hamagaki: First results from the ALICE experiment at LHC; 5th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on High Energy Strong Interactions 2010: HESI10, 2010/8/12, Kyoto University
- ⑲ Y. Hori, H. Hamagaki, T. Gunji: Simulation study for forward calorimeter in LHC-ALICE experiment; 14th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 2010), 2010/5/11, Beijing, China

[その他]

ホームページ等

<http://phenix.cns.s.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱垣 秀樹 (HAMAGAKI HIDEKI)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 90114610

### (2) 研究分担者

郡司 卓 (GUNJI TAKU)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 10451832  
黒澤 真城 (KUROSAWA MAKI)  
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員  
研究者番号: 10462681

### (3) 連携研究者

竹谷 篤 (TAKETANI ATSUSI)  
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・前任研究員  
研究者番号: 30222095