

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287047

研究課題名(和文)LHC-ALICE実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発

研究課題名(英文)High speed data acquisition system for the forward photon detector at the LHC-ALICE experiment

研究代表者

中條 達也(Chujo, Tatsuya)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：70418622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CERN 研究所・LHC-ALICE実験における次期検出器高度化計画の1つである超前方光子検出器(FOCAL, Forward Calorimeter)用の高速データ読み出しシステムを開発した。実際のFOCAL検出器試作機を用いて、我々が新しく構築した読み出しシステムにより、検出器の性能を評価した。その結果、FOCAL検出器はエネルギー分解能、エネルギー線形性等、所定の性能を有していることが分かった。また次世代高速読み出しシステム VMM2/3 の開発をCERN-RD51 と開始し、その初期成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed the new readout system for the Forward Electromagnetic Calorimeter (FOCAL) for the future upgrade of the ALICE experiment at the LHC at CERN. We confirmed that the current readout system and FOCAL prototype have the expected performance regarding the energy resolution and energy linearity. We also started the R&D of the high speed data acquisition system, called VMM2/3 with CERN RD51 collaboration, and obtained the initial results.

研究分野：原子核物理学(実験)

キーワード：高エネルギー原子核衝突 電磁カロリメータ シリコン検出器 LHC 加速器 ALICE 実験 前方の物理  
カラーガラス凝縮 QGP熱化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 高エネルギー重イオン物理学の分野はこの15年間、RHIC, LHC 両加速器を使った実験により、ジェット消滅、大きな方位角異方性、バリオン生成異常など我々日本グループが大きく寄与した多くの発見を経て、強く相互作用するクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) の発見に至った。しかし未解決の重要課題の一つに、いかにして QGP が誕生し、0.2 fm/c もの瞬時に熱平衡化に至るのか、まだ分かっていない。

(2) この謎を解明するには前方領域 (ビーム軸  $0^\circ$  近傍) にアクセスすることが非常に重要である。なぜなら、前方領域には重イオンの衝突初期や熱化に関する多くの情報が隠されているからである。中でも前方の光子測定を行うことにより、従来のハドロンを使った測定より明確に、衝突初期条件の決定、カラーガラス凝縮 (CGC) と呼ばれる未発見のグルーオン飽和の検証、および熱平衡化に関する物理量を引き出すことが可能となる。

(3) しかし前方の光子測定は粒子密度が非常に高く、実験的にアプローチすることが困難なため、これまで測定されてこなかった。ところが近年のシリコン技術の発展により、この未開拓の領域に実験的にアプローチできるようになってきた。この新しい領域での物理を推進するため、LHC-ALICE 実験グループは、超前方電磁カロリメータ光子検出器 (FOCAL, Forward Calorimeter) の建設・設置を計画している。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、FOCAL 検出器のシグナルを高粒子密度、高レート環境下で読み出し可能なシステムの開発である。高速データ読み出し系「SRS」バックエンド部とフロントエンド部「FEE」を開発する。CERN 研究所の LHC-ALICE 実験の FOCAL 検出器に高速読み出し系を導入し、将来の予定されている陽子-鉛衝突事象 (5.02 TeV) にて 200 kHz でシグナルを読み出し、LHC エネルギーで未開拓の超前方の物理学を推進する。

### 3. 研究の方法

(1) FOCAL 検出器をシミュレーションによって評価し、検出器デザインの妥当性、目標とする物理測定が可能かどうかを検証する。

(2) 筑波大学に FOCAL 専用のデータ較正用テストベンチを構築する。FOCAL 試作機は、オークリッジ研究所 (ORNL, 米国) で開発されたものを使用し、LED パルスや、宇宙線、ベータ線源などを使って検出器のチャンネルマップ作成、ゲインなど較正パラメータを求める。読み出しには CERN-RD51 コラボレーションが開発した SRS (Scalable Readout System) と APV25 hybrid チップによるアナログ読み出しを使用する。

(3) CERN PS/SPS 加速器のテストビーム

ラインを使い、我々が構築した読み出しシステムによる FOCAL 検出器試作機の性能評価実験を行う。

(4) CERN-RD51 コラボレーションと共同研究を行い、次世代の高速読み出しシステム“VMM2/3”の開発を行う。

### 4. 研究成果

(1) ユトレヒト大学 (オランダ) と共同で、FOCAL 検出器のシミュレーションによる評価を 2013 年に行った。大学院生 2 名、スタッフ 1 名を筑波大学から約 1 ヶ月派遣し、FOCAL 検出器の基本性能、特に重イオン衝突環境化での中性中間子再構成、また FOCAL を構成する MAPS 検出器の電氣的ノイズレベルの変化によるシグナル検出効率の評価を行った。これらのシミュレーション結果は、現在準備中の ALICE FoCal 検出器の Lol (Letter of Intent) に掲載予定である。

(2) 米国・オークリッジ研究所 (ORNL) を 2014 年 1 月に訪問し、同グループが開発した FOCAL PAD 試作機 (図 1) を筑波大学に移送し、CERN 研究所や筑波大学にて本試作機の性能評価実験を行うことで合意した。これは、筑波大グループが今後、本計画の開発中心グループとしてプロジェクトを推進していく上で、重要な一歩となった。

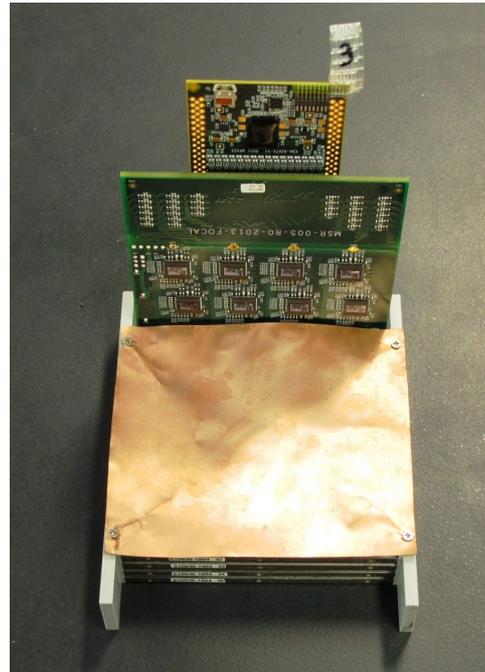


図 1 : FOCAL 試作機 (ORNL 製) とシグナル summing board, APV25 hybrid チップ

(3) 筑波大・筑波技術大は、ALICE の既存の電磁カロリメータ検出器 (EMCAL/DcaI) の製作と運用に大きく携わっている。我々は、同検出器で使用した SRS 読み出しシステムを FOCAL 検出器に採用した。フロントエンドには、APV25 ハイブリッドチップ (128 チャンネル)、読み出しソフトは mmDAQ を用い

た(図2)。2014年8月、同システムによる FOCAL 検出器のシグナル読み出しに成功した。



図2：SRS 読み出しシステム(筑波大学)

(4)筑波大学にて FOCAL 検出器専用のテストベンチシステムを構築した。同システムにより、FOCAL のシリコンパッド(Si PAD)のLED光によるシグナル確認、チャンネルマップ、データ較正が容易にできる様になった。また宇宙線、ベータ線源、レーザー光など様々なソースを使ったデータ較正が可能となった。

(5)2014年と2015年、それぞれ約1.5ヶ月間、CERN PS, SPS 加速器を使ったテストビーム実験を遂行した。2年間で大学院生を含む約15名体制で実験を行った。実験には、ユトレヒト大学(オランダ) VECC(インド)などのグループと共同で実験を行った。図3はテストビーム実験のセットアップである。

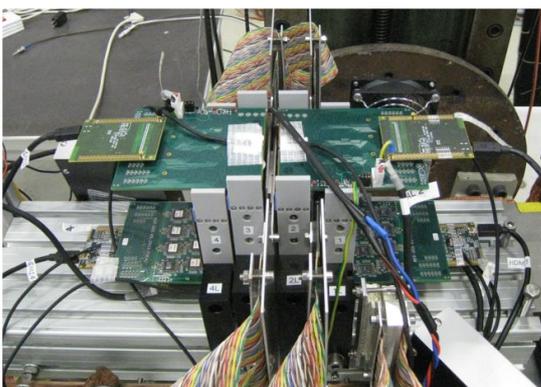


図3：FOCAL 検出器試作機の CERN PS-SPS テストビーム実験の様子

(6) FOCAL 試作機(図5)のエネルギー分解能とエネルギー線形性を評価した。今回の検出器は、1セグメントが4枚のタングステン(3.5mm, 1放射長に相当)の上にそれぞれ、Si-PAD(約1cm<sup>2</sup>, 8x8)で較正されるものを4つ配置したデザインになっている。目標とするエネルギー分解能は25/√E(%)である。エネルギー分解能はほぼ予想通りの約25/√E(%) (Eは入射電子・光子のエネルギーGeV)の性能を有することが分かった(図4)。

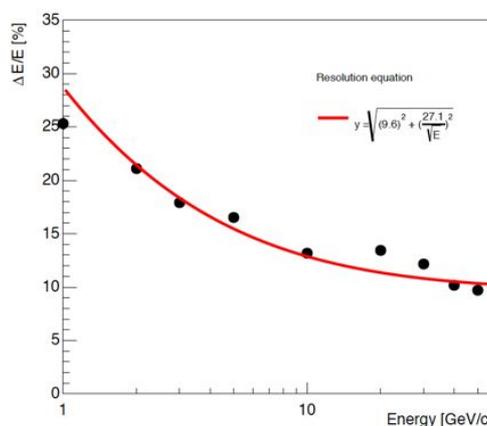


図4：CERN PS-SPS 実験における FOCAL 試作機のエネルギー分解能(2015年取得データ)。横軸は入射電子のエネルギー、縦軸は分解能(%)。

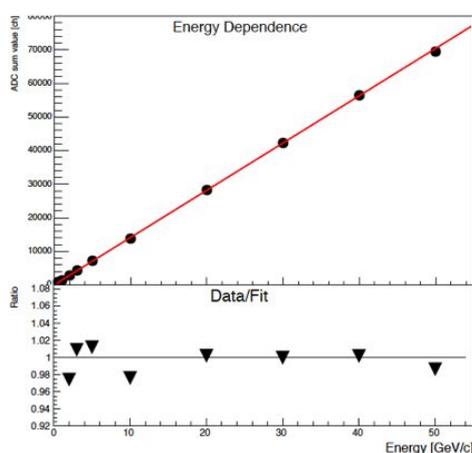


図5：CERN PS-SPS 実験における FOCAL 試作機のエネルギー線形性(2015年取得データ)。

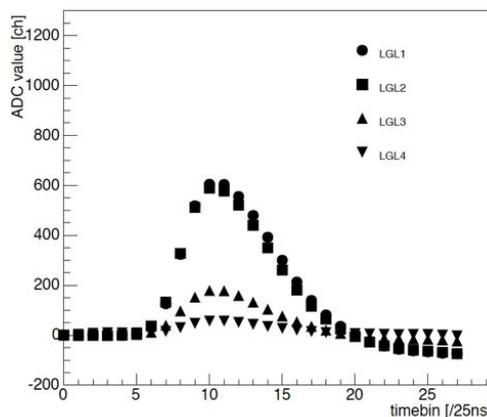


図6：CERN PS 実験における 2GeV/c 電子ビームによる FOCAL 試作機の波形(2015年取得データ)。LGL1はビーム最上流側、順にLGL2, LGL3, LGL4と続く。横軸は時間(25nsec/bin)、縦軸は波高(2015年データ)。

またエネルギー線形性についても 数 GeV から 60 GeV までの範囲で、約 3% 以内の線形性を持つことが分かった (図 5)。今後、電氣的ノイズのさらなる削減などの改善が見込まれるが、本試作機は概ね予想通りの性能を有していることが分かった。また波形情報、縦・横方向シャワーの広がりの評価も行い、検出器がデザイン通り動作していることが確認された (図 6、図 7)。

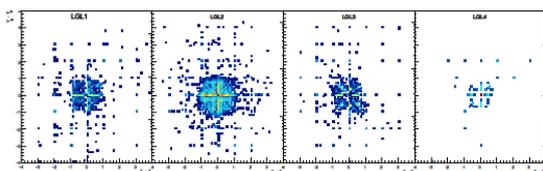


図 7 : 2 GeV/c 電子ビームによる横方向のシャワープロファイル。左から LGL1 (ビーム上流側), LGL2, LGL3, LGL4 (最下流)を示す。横方向のシャワーの広がりが予想されるモリエル半径とほぼ一致した (2015年データ)。

(7) 2015年、次世代の高速読み出しを可能にするため、VMM2/3の開発・評価を CERN RD51 グループと共同で行った (2015年10月に筑波大は RD51 コラボレーションに正式加入)。CERN 研究所 RD51 ラボ内に筑波大専用のテストベンチを構築し、大学院生を長期派遣し、VMM2/3 による読み出しシステムの性能を評価した (図 8)。



図 8 : ATLAS BNL グループが開発中の VMM2 チップ。CERN-RD 51 グループと共同で FOCAL 検出器用に開発・改良を行っている。

VMM2/3 は ATLAS BNL グループが開発を次世代の  $\mu$  粒子測定のために開発を行っている読み出しチップであり、APV25 が数 kHz ま

での読み出しが限界であるのに対し、VMM2/3 は ADC 搭載チップのデジタルシグナル出力処理により、最高 4M Hz での読み出しが可能である。今回この VMM2 チップの基本性能を評価した。チャンネル毎のゲインのばらつきなど改善が必要な部分は残るものの、シグナル検出に関しては、所定の性能を有していることが確認できた。レート耐性に関しては、ソフトウェアの改善等が必要であるため、今後の課題である。

(8) 今回の研究により、FOCAL PAD 検出器が所定の性能を有していることが確認された。得られた結果は、現在、投稿論文として公表する準備を進めている。今後は、ALICE 実験に導入するため実機デザインの決定、読み出し部のさらなる低ノイズ化と高速化を図る。これらは、アナログ summing board の改良や、VMM2/3 の共同開発、ALICE の SAMPA チップの導入を進めることで、十分達成可能である。2016年9月には、3回目となる SPS テストビーム実験を行い、FOCAL 試作機の低ノイズ化、および数 100 GeV までの幅広いダイナミックレンジでのエネルギー測定と、分解能と線形性を評価する。

#### 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 1 件)

M. Inaba, T. Chujo, M. Hirano, Development of the FoCal PAD detector and its electronics for the ALICE experiment at the LHC, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Oct, 2015, 1-3, DOI: 10.1016/j.nima.2015.10.055, 査読有

[学会発表](計 18 件)

Byung Chul Kim (for the RD51 collaboration), 中條達也、稲葉基 ほか, ALICE FoCal-E PAD 検出器の信号読み出しに向けた VMM2 チップの性能評価, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学, 宮城県仙台市

平野勝大 (for the ALICE FoCal collaboration), 中條達也、稲葉基、ほか, LHC-ALICE 実験のアップグレードに向けた超前方光子測定用電磁力ロリメータ Si PAD 検出器の性能評価, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学, 宮城県仙台市

Masahiro Hirano, Tatsuya Chujo,

Motoi Inaba, Detector R&D of the Forward Calorimeter with PAD readout for the ALICE upgrade, Quark Matter 2015, 2015年9月27日～10月3日, Kobe, Hyogo, Japan

Masahiro Hirano, Research and development for the Forward Calorimeter as an ALICE upgrade project to study forward physics, Workshop on forward physics and high-energy scattering at zero degrees, 2015年9月12日, Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan

Motoi Inaba, Tatsuya Chujo, Masahiro Hirano, Development of the FoCal PAD detector and its electronics for the ALICE experiment at the LHC, 13th PISA Meeting on Advanced Detectors, 2015年5月24日 - 30日, Isola D'Elba (La Biodala), Italy

中條 達也, 前方の物理(実験), チュートリアル研究会、重イオン衝突の物理; 基礎から最先端まで, 2015年3月25日～3月27日, 理化学研究所 和光キャンパス(埼玉県和光市)

佐藤 航, LHC-ALICE 実験における超前方光子測定用カロリメータ試作機のデータ処理系の構築と性能評価, 日本物理学会 第70回年次大会(2015), 2015年3月21日～3月24日, 早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都新宿区)

稲葉 基, LHC-ALICE 実験のための前方光子検出器(FoCal)プロトタイプ評価用電子回路の開発, 日本物理学会 第70回年次大会(2015), 2015年3月21日～3月24日, 早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都新宿区)

W. Sato, Forward Calorimeter: Detector, France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, 2015年3月14日～3月15日, VVF Villages, Sante-Maxime, France

T. Chujo, Forward Calorimeter: Physics, France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, 2015年3月14日～3月15日, VVF Villages, Sante-Maxime, France

中條達也, ALICE の forward 物理, ハドロン散乱ゼロ度測定勉強会, 2015年3月2日, 名古屋大学研究所共同館(愛知県名古屋市)

T. Chujo, Forward Calorimetry in ALICE at LHC, HAWAII 2014, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, 2014年10月7日～10月11日, the Hilton Waikoloa Village on

Hawaii's Big Island, USA

T. Chujo, Calorimetry in ALICE at LHC, TIPP 2014, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, 2014年6月2日～6月6日, Amsterdam, the Netherlands

T. Chujo, Forward Direct Photons with FoCal in ALICE, ALICE Physics Analysis and Tire 1/2 Workshop, 2014年3月4日, 筑波大学大学会館(茨城県つくば市)

T. Chujo, ALICE status, ALICE Physics Analysis and Tire 1/2 Workshop, 2014年3月3日, 筑波大学大学会館(茨城県つくば市)

中條達也, 「RHIC/LHC/J-PARC の次期計画; 高エネルギー重イオン衝突の新展開」シンポジウム・高温クォーク物質研究の最前線、日本物理学会、2013年秋季大会、2013年9月21日、高知大学新倉キャンパス(高知県高知市)

Tatsuya Chujo, Summary of recent results from LHC, 2013 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, 2013年6月27日、ブルックヘブン国立研究所(米国)

中條 達也, Exploitation of hard electro-magnetic probes and jets to study the QGP with LHC ALICE, Joint Workshop for the France-Japan (TYL) and France-Korea (FKPPL) Particle Physics Laboratories, 2013年6月4日、Yonsei University, Seoul, Republic of South Korea

[その他]

ホームページ等

筑波大学高エネルギー原子核実験グループ

<http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp>

ALICE 日本グループホームページ

<http://alice-j.org>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中條 達也 (CHUJO, Tatsuya)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号: 70418622

### (2) 研究分担者

三明 康郎 (MIAKE, Yasuo)

筑波大学・副学長・理事

研究者番号: 10157422

杉立 徹 (SUGITATE, Toru)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号: 80144806

稲葉 基 (INABA, Motoi)

筑波技術大学・産業技術部・准教授  
研究者番号： 80352566