

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02882

研究課題名(和文)次世代電子陽電子コライダー実験を可能にする超高精細カロリメータ技術の確立

研究課題名(英文)Development of high granularity scintillator calorimeter technology for future electron-positron collider experiment

研究代表者

大谷 航(Ootani, Wataru)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授

研究者番号：30311335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代電子陽電子コライダー実験における超精密研究のための高精細シンチレータカロリメータ技術を開発するものである。これまでの技術的諸課題を解決するとともに、さらなる高性能化を可能にする新たなSiPM読み出し技術を開発した。光量位置依存性、ランダムノイズ軽減、ヒット位置再構成など期待通りの性能を有することを示した。開発した技術を組み込んだ実機相当層数のシンチレータストリップカロリメータ大型試作機を建設し、LED試験・宇宙線試験により、その性能を実証した。さらに、SiPM読み出しシンチレーション検出器特有の課題であるSiPMの飽和現象の画期的な測定方法を開発することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発に取り組んだ高精細シンチレータストリップカロリメータ技術は、次世代電子陽電子コライダー実験に必要な測定器技術である。他の候補技術に比べて性能を大きく損なうことなく読み出しチャンネル数を一桁程度少なく抑えることができるという有意性も併せ持つため、本測定器技術の確立は次世代電子陽電子コライダー実験実現に向け大きな意義を持つ。また、本研究で開発したSiPMの大規模使用による高精細カロリメータ技術、およびSiPMの較正手法は、素粒子実験のみならず他分野への応用が可能であり、大きな波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study develops a high-granularity scintillator-based calorimeter technology for precision research at next-generation electron-positron collider experiments. We have developed a new SiPM readout technique that solves various technical problems and enables further performance improvement. We have shown that the new SiPM readout technique has the expected performance in terms of light yield position dependence, random noise reduction, and hit position reconstruction. A large full-layer prototype of the scintillator strip calorimeter was constructed and its performance was successfully evaluated through LED and cosmic ray tests. Furthermore, we succeeded in developing an innovative measurement method for SiPM saturation phenomena, which would be a crucial issue in SiPM readout scintillation detectors.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：電子陽電子コライダー シンチレータカロリメータ PFA SiPM

1. 研究開始当初の背景

2012年に発見されたヒッグス粒子の徹底研究を足がかりに標準理論を超える新しい物理の全容を解明するため、国際リニアコライダー(ILC)をはじめとする次世代の電子陽電子コライダー実験が提案されている。電子陽電子コライダー実験において重要な事象の多くはその終状態にハドロンジェットを含むため、ジェットを精度良く測定することが極めて重要であり、そのために Particle Flow Algorithm (PFA) という優れたコンセプトに基づく革新的な超高精度測定器の開発が進められている。本研究グループでも新型半導体光センサー silicon photomultiplier (SiPM) 読み出しによる高精細シンチレータカロリメータの開発を行ってきたが、実機建設開始に向けて残された技術的課題を解決するとともにさらなる高性能化を図る必要があった。

2. 研究の目的

超高精細電磁カロリメータの有力候補であるシンチレータストリップカロリメータについて、二重 SiPM 読み出しという新しい手法を導入することで技術的課題を解決するとともに、光センサー、シンチレータ等の基本構成要素の改良も行い、シンチレータカロリメータ技術の高性能化を図る。これにより次世代電子陽電子コライダー実験を可能にする超高精細カロリメータ技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

高精細シンチレータストリップカロリメータ技術の高性能化を実現するため、二重 SiPM 読み出しの基本設計を確立し、性能評価試験を行った。確立したシンチレータストリップ技術をもとに大型技術試作機を製作し、性能実証試験を実施した。並行して、SiPM 読み出しシンチレーション検出器の性能を左右する SiPM の飽和現象を測定する新手法の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 二重 SiPM 読み出し法の開発

二重 SiPM シンチレータストリップユニットの設計最適化を行った。ストリップと SiPM の光学結合としてストリップの下面にくぼみを設け、基板に半田付された SiPM を格納する “SiPM-on-strip” 方式を採用することで、検出光量の位置依存性を改善し、単 SiPM 読み出しより大きい検出光量を得ることができた(図 1)。さらに、2つの SiPM 出力の電荷、時間の差を用いて、ヒット位置を再構成することに成功した(長さ 90mm のストリップに対して位置分解能 20mm(sigma))。また、両出力の同時計数条件を課すことで SiPM 特有のダークノイズに起因するランダムノイズを劇的に軽減することに成功した(図 2)。これにより、検出器閾値を下げ検出効率を改善することが示された。二重読み出し法の要求性能が達成されたため、後述のシンチレータストリップカロリメータ大型試作機に搭載し、実際のビーム環境でさらなる性能実証を行うこととした。

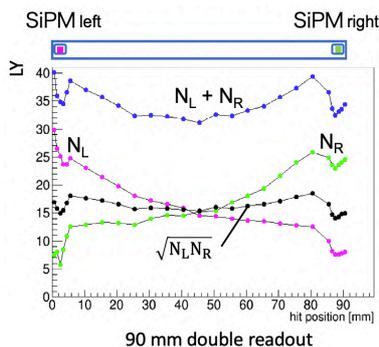


図 1 二重読み出しストリップの光量の位置依存性

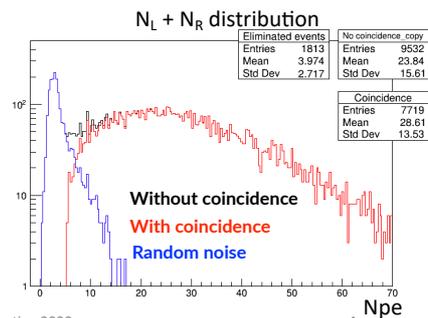


図 2 同時計数によるランダムノイズの軽減

(2) シンチレータストリップカロリメータ大型試作機の建設と性能評価

高性能化した高精細シンチレータストリップカロリメータ技術を実証する大型試作機を製作し(図 3)、性能評価試験を行った。大型試作機の開発は、中国 USTC、IHEP の研究グループと共同で行われた。実機相当の 30 層の検出層から成っており、通常の単 SiPM 読み出しストリップとともに、二重 SiPM 読み出しストリップも組み込まれている。当初ビーム試験による性能評価試験を行う予定であったが、COVID-19 感染拡大の影響により残念ながら研究期間内にビーム試験を実施することができなかった。ビ

ーム試験の代わりに、長期の LED 試験(1 ヶ月)、宇宙線試験(3 ヶ月)を実施し大型試作機の性能評価を行った。試作機のほとんどのチャンネルは正常に動作することを確認した。長期試験において検出器各パラメータの長期安定性、測定性能の評価を行い、宇宙線による最小電離事象の信号の大きさのわずかな減少が観測されたものの(原因については調査中)、それ以外のパラメータはすべて安定であることがわかった。宇宙線事象を用いた測定性能評価を実施し、ヒット検出効率 85%、位置分解能 1.5-2.3mm など期待通りの性能を有していることが示された。さらに、長期宇宙線試験において観測された宇宙線ミュー粒子によるシャワー事象の解析が行われ(図 4)、観測されたシャワー特性はシミュレーションによる予想とよく一致していることが確認された(図 5)。今後の課題としてビーム試験による最終性能実証が残されているものの、大型試作機は期待通りの性能を有していることがわかった。



図 3 シンチレータストリップカロリメータ大型試作機

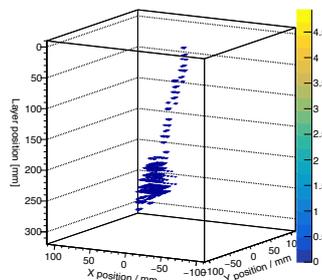


図 4 大型試作機で観測した宇宙線シャワー事象

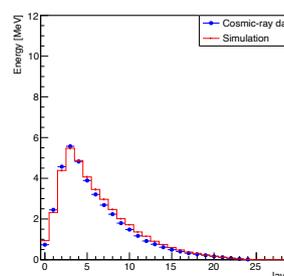


図 5 宇宙線によるシャワー事象のシャワープロファイル

(3) SiPM 飽和現象の新しい較正方法の開発

SiPM に大量の光子が入射した場合に起こる SiPM 出力の飽和現象は、本研究で開発する SiPM 読み出しシンチレータカロリメータの性能に影響を与える可能性があり、飽和現象を正確に測定し補正を行う必要がある。これまで、SiPM の飽和特性は速い可視光レーザーで測定されてきたが、シンチレーション発光時定数の効果が反映されないという大きな問題があった。そこで本研究では、検出器シンチレータに UV 光を入射し励起したシンチレーション光を用いて SiPM の飽和特性を測定するというまったく新しい手法を開発した(図 6)。これはシンチレーション発光時定数だけでなく測定回路系の飽和特性など全ての効果を合わせて測定することができる画期的な手法である。この手法で測定した飽和特性では、予想通りシンチレーション発光時定数の影響により従来法で測定したものに比べて大きく飽和が緩和されていることが示された(図 7)。

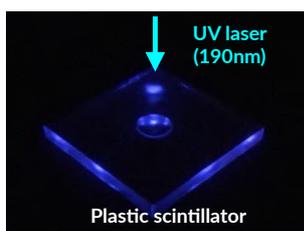


図 6 UV 光入射により励起されたシンチレーション光

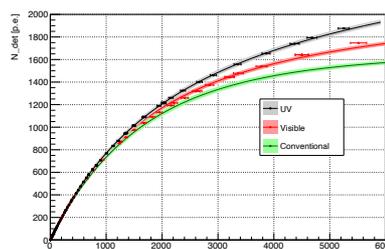


図 7 本研究で開発した新手法により測定した SiPM 飽和現象

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 W. Ootani on behalf of CALICE Collaboration	4. 巻 ICHEP2020
2. 論文標題 Exploring the structure of hadronic showers and the hadronic energy reconstruction with highly granular calorimeters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PoS(ICHEP2020)	6. 最初と最後の頁 862
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.390.0862	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 R. Masuda, W. Ootani, N. Tsuji, L. Liu	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of double SiPM readout method for ILD scintillator electro-magnetic calorimeter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06002 ~ C06002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/06/C06002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 N. Tsuji, W. Ootani, L. Liu, K. Yoshioka, Y. Morita, M. Gonokami	4. 巻 15
2. 論文標題 Study on saturation of SiPM for scintillator calorimeter using UV laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C05052 ~ C05052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/15/05/c05052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Oya, Satoru Kobayashi, Toshinori Mori, Wataru Ootani, Kazuki Toyoda, Kosuke Yanai	4. 巻 27
2. 論文標題 A Comparative Study on Various Methods for SiPM Gain Calibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.27.012011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoru Kobayashi, Jiri Kvasnicka, Linghui Liu, Wataru Ootani, Tatsuro Torimaru, Naoki Tsuji	4. 巻 27
2. 論文標題 Scintillator Hodoscope with a Few Millimeter Position Resolution for Cosmic-ray Test Stand	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.012009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Naoki Tsuji, Linghui Liu, Tatsuro Torimaru, Toshinori Mori, Wataru Ootani	4. 巻 27
2. 論文標題 Study on Granularity Optimization for ILD Hadron Calorimeter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.012015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 上田裕貴
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精度シンチレータ電磁カロリメータの時間分解能の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田隆之介
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精度シンチレータ電磁カロリメータのシミュレーションを用いた性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻直希
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータの大型試作機による性能実証
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田隆之介
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用シンチレータ電磁カロリメータのシミュレーションを用いた性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直希
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータの大型試作機を用いた性能実証
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田樹
2. 発表標題 UVレーザーを用いたSiPMの飽和現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田隆之介
2. 発表標題 シミュレーションを用いたILD用シンチレータ電磁カロリメータの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直希
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータの大型試作機によるテストビーム実験
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田樹
2. 発表標題 ILC用シンチレータ電磁カロリメータにおけるSiPMのUVレーザーを用いた飽和現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻直希
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータ -テストビーム実験-
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田隆之介
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータ -検出層の性能-
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田樹
2. 発表標題 UVレーザーを用いたSiPMの飽和現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 W. Ootani
2. 発表標題 Exploring the structure of hadronic showers and the hadronic energy reconstruction with highly granular calorimeters
3. 学会等名 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 W.Ootani
2. 発表標題 Photon Detectors
3. 学会等名 Excellence in Detector and Instrumentation Technologies (EDIT-2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田隆之介、大谷航、他
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータ -検出層の開発-
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻直希、大谷航、他
2. 発表標題 次世代電子陽電子コライダー用高精細シンチレータ電磁カロリメータ -大型技術プロトタイプ建設-
3. 学会等名 日本物理学会2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉靈輝、大谷航、他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ大型試作機テストビーム実験データを用いた粒子分別能の評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻直希、大谷航、他
2. 発表標題 ILC電磁カロリメータにおけるMPPCの飽和現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田隆之介、大谷航、他
2. 発表標題 ILC電磁カロリメータにおけるシンチレータストリップ両側読み出し手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉靈輝、大谷航、他
2. 発表標題 UVパルスレーザーによる半導体光センサSiPMのシンチレーション光に対する飽和現象の測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Masuda, W. Ootani, et al.
2. 発表標題 Development of new SiPM readout method for ILD scintillator electromagnetic calorimeter
3. 学会等名 The 2019 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Tsuji, W. Ootani, et al.
2. 発表標題 Study on Saturation of SiPM using UV laser
3. 学会等名 The 2019 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Tsuji, W. Ootani, et al.
2 . 発表標題 Study on Saturation of SiPM for scintillator calorimeter using UV laser
3 . 学会等名 CHEF2019 - Calorimetry for the High Energy Frontier (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Masuda, W. Ootani, et al.
2 . 発表標題 Development of double SiPM readout method for ILD scintillator electro-magnetic calorimeter
3 . 学会等名 CHEF2019 - Calorimetry for the High Energy Frontier (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Tsuji, W. Ootani, et al.
2 . 発表標題 Performance study on larger scintillator tile for granularity optimization at ILD AHCAL
3 . 学会等名 Asian Linear Collider Workshop (ALCW2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 大谷航
2 . 発表標題 ILC建設に向けて -測定器開発-
3 . 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 劉靈輝, 大谷航, 他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ大型試作機のテストビーム実験 - 性能評価 -
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻直希, 大谷航, 他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータの精細度の最適化に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥丸達郎, 大谷航, 他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ大型試作機のテストビーム実験 - 概要と検出器較正 -
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉靈輝, 大谷航, 他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ大型試作機テストビーム実験データを用いた粒子分離性能についての研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻直希、大谷航、他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータの最適な精細度に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥丸達郎、大谷航、他
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ大型試作機テストビーム実験データ解析におけるイベント選別とエネルギー補正
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wataru Ootani
2. 発表標題 AHCAL - Status and Perspectives
3. 学会等名 CALICE AHCAL、2017 Americas Workshop on Linear Colliders (AWLC17), SLAC, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林暁、大谷航、恩田理奈、辻直希、鳥丸達郎、森俊則、劉靈輝
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータ検出層宇宙線試験装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 劉靈輝, 大谷航, 森俊則, Daniel Jeans
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータの性能評価に関するシミュレーション研究
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直希, 大谷航, 恩田理奈, 鳥丸達郎, 森俊則, 劉靈輝
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータのシンチレータタイルサイズの最適化に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳥丸達郎, 大谷航, 恩田理奈, 小林暁, 辻直希, 森俊則
2. 発表標題 量産性に優れたILDハドロンカロリメータ検出層設計に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Linghui Liu
2. 発表標題 Simulation study on optical cross-talk for AHCAL
3. 学会等名 CALICE collaboration meeting, Tokyo, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoki Tsuji
2. 発表標題 Study on larger scintillator tile for AHCAL
3. 学会等名 CALICE collaboration meeting, Tokyo, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuro Torimaru
2. 発表標題 Simulation study on optical crosstalk for AHCAL
3. 学会等名 CALICE collaboration meeting, Tokyo, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Linghui Liu
2. 発表標題 Simulation study on optical crosstalk for AHCAL
3. 学会等名 ILC detector meeting, KEK, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Ootani
2. 発表標題 ILD for the International Linear Collider
3. 学会等名 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Atlanta, USA (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Ootani
2. 発表標題 Studies with 60mm tiles
3. 学会等名 CALICE collaboration Meeting, Mainz, Germany
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Linghui Liu
2. 発表標題 Construction and commissioning of cosmic-ray test stand for AHCAL large prototype
3. 学会等名 ILC detector meeting, KEK, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoki Tsuji
2. 発表標題 Performance study on larger scintillator tile for granularity optimisation for ILD AHCAL
3. 学会等名 ILC detector meeting, KEK, Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻直希, 大谷航, 鳥丸達郎, 森俊則, 劉靈輝
2. 発表標題 ILDハドロンカロリメータのための60mm角シンチレータタイルを用いた検出層プロトタイプの製作と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉靈輝, 大谷航, 森俊則, 鳥丸達郎, 辻直希, 小林暁
2. 発表標題 ILD AHCAL大型プロトタイプに用いる検出層の試験/宇宙線試験装置の建設と実装
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥丸達郎, 大谷航, 小林暁, 辻直希, 森俊則, 劉靈輝
2. 発表標題 ILD AHCAL大型プロトタイプに用いる検出層の試験/試験結果と検出層性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	駒宮 幸男 (Komamiya Sachio) (80126060)	早稲田大学・理工学術院・上級研究員(研究院教授) (32689)	
連携研究者	山下 了 (Yamashita Satoru) (60272465)	東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 CALICE Collaboration Meeting	開催年 2017年～2017年
--	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	DESY			
中国	USTC	IHEP		