

Ozaki Exchange Program 2020 報告書

名古屋大学理学研究科理学専攻物理学領域 博士後期課程1年

前田 朱音

amaeda@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

2022年(令和4年)10月10日

1 はじめに

私は Ozaki Exchange Program 2020 に参加した。本プログラムは人材交流を目的としており現地渡航が必須条件であったが、2020年のCOVID-19によるパンデミックにより渡航を断念した。2022年に入り渡航が可能になったため同年6月28日から同年9月6日までアメリカのSLAC National Accelerator Laboratory に赴き研究をおこなった。

2 活動内容

活動期間中は2029年に開始が予定されているCERNのHL-LHCに向けたATLAS検出器のアップグレードに関わった。HL-LHCではルミノシティをRun3の2倍程度にすることでトリガーとパイルアップのレートが10倍程度になることが予想されている。同時にATLAS検出器の検出可能範囲の拡大も予定されており、検出器の改良が必要になる[1]。その中でも私はInner Tracker 検出器の開発に関わった。

2.1 Inner Tracker 検出器の概要

図1のInner Tracker (ITk) 検出器は現行のATLAS検出器の最内層に位置するInner Detectorに替わる検出器として開発されている。これを交換することでルミノシティの向上によるトリガーレートの増加に対応すると同時に検出可能範囲も拡大する。

シリコン半導体のpixel検出器が各モジュールの背面に、前面には読み出しのためのASICを含む回路が図2のように搭載されている。荷電粒子が半導体のnp接合層を通過する際に引き起こされる電離電子を信号として読み出す。np接合層がASICが3つ搭載されたTripletは垂直に $25\mu\text{m}$ 、ASICが4つのQuadは水平に $100\mu\text{m}$ の層厚で配置されている。これは垂直配置によるドリフト時間の短縮により放射線耐性が向上するためである。

ASICはRD53Aと呼ばれており、検出器やデータ輸送の制御をおこなう。

Inner Barrelには図3のようにL0 Stave, L1 Stave やRingが存在し、それらから得られた信号はPP0と呼ばれる基板に集められ、より後段の読み出しシステムへと送信される。受け入れ先の研究室ではこれらの読み出し系と検出器組み立てのための開発をおこなっていた。そこで私は、モジュール-Ring-PP0間のデータ転送試験と、L1 Stave へのモジュールの実装方法の開発をおこなった。

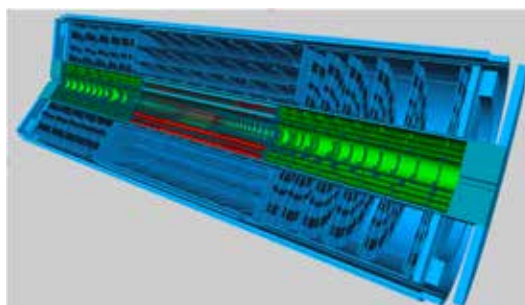


図1: ITk 検出器の概観。検出器は大きく中央のBarrel部と左右のEndcap部に分けられる。さらに各部は内側からInner, Outer, Stripの3つに分けられる[1]。

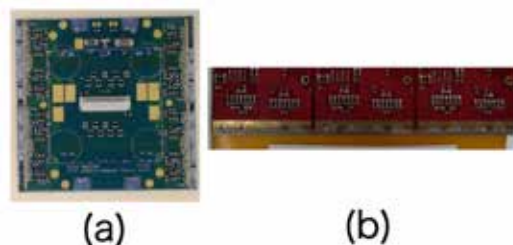


図2: 今回の研究で使用したモジュール。(a)はQuadと呼ばれL1部分に使用される。名前の通りASICのチップを4つ搭載している。(b)はTripletと呼ばれASICを3つ搭載している。TripletにはL0 Stave用のStraightとRing用のCurveの2種類が存在する。

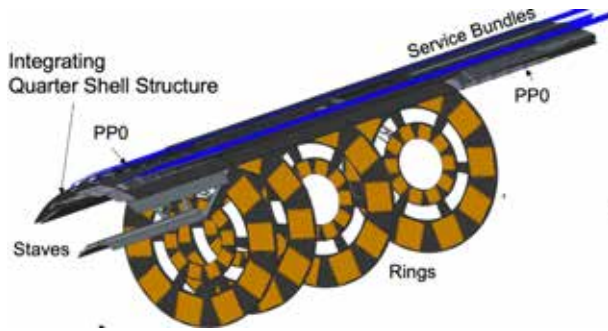


図 3: L0, L1 Stave 周囲の構造. 内側から L0, L1 と数えられ, 板状の構造は Stave, 円形の構造は Ring と呼ばれる. L0 Stave には Triplet が, L1 Stave には Quad がインストールされる. Ring には両方のモジュールが L0, L1 に対応する位置にインストールされる [2].

2.1.1 Triplet のデータ転送テスト

初めに試作機(図4)の Ring 上のモジュールナンバーと PP0 上のモジュールナンバーを対応させる作業から始めた. 加えて各モジュールには制御用の 1 レーン (CMD), データ転送用の 3 レーンの計 4 本の信号をやりとりするレーン¹が存在し, データ用のレーンは Ring 側と PP0 側で異なるレーンに接続されるのでそれら全ての接続を調べた. 発振機を用いてダミーの矩形波を Ring に入力し, 出力されるレーンを確認した.

対応表の作成後はモジュール-Ring 間をつなぐ 16 本の Flex と呼ばれるケーブルのデータ転送精度を測定した. 測定自体はモジュールからの信号を Ring と Flex 経てオシロスコープで読み出し, 図5のようなアイダイアグラムの幅を測定するものだった. 測定自体は大きな問題なく進みすべての Flex 通過後のアイダイアグラムの大きさが 350 ps 程度と問題のない範囲で機能することを確認した. 最後に一連のデータ転送効率を DP ケーブルの長さごとに測定した. だが, 途中で測定器の不調により最後まで測定することができなかった. 測定できた範囲では図6のように CMD の一つに問題があることがわかった.



図 4: 測定中の様子. 中央の Ring の右上が Quad モジュール, 左側が PP0. PP0 の右下から伸びるのが DP ケーブルで後段の読み出しにつながる.

¹一つの接続端上に存在するデータ伝送路のこと

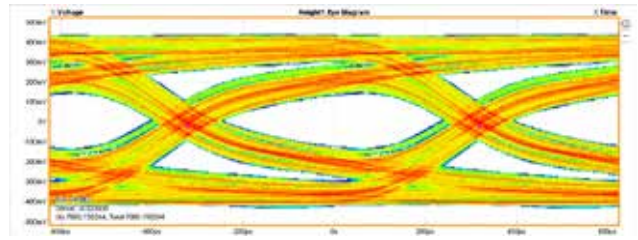


図 5: 測定したアイダイアグラムの例. 縦軸が信号の大きさ [mV], 横軸が時間 [ps] を表す. 右の交差点と左の交差点の間隔を測定する. 間隔が広いほど良い. 今回の測定では 350 ps 程度の幅で正常だった.

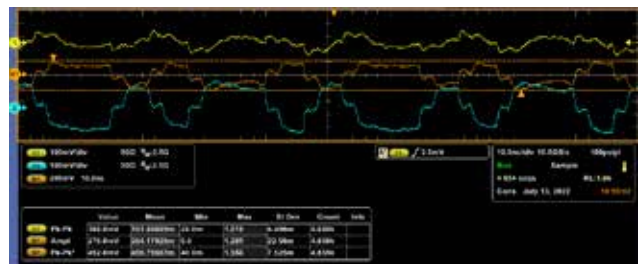
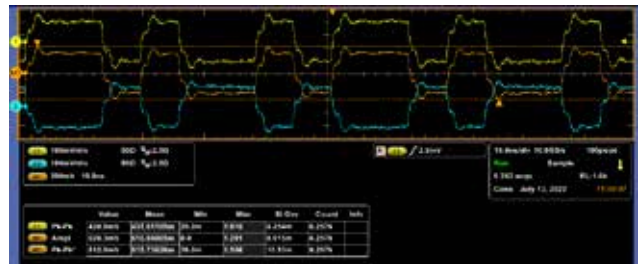


図 6: 上: 正常な CMD 信号, 下: 問題のある CMD 信号. モジュールや発信機に問題がないことは確認したので, PP0 か Ring に問題があると思われる.

2.1.2 モジュール接着方法の検討

受け入れ先では各モジュールを Stave や Ring に接着する方法の開発もおこなわれていた. 各モジュールは開発済みのエポキシ系接着剤をカーボン製の土台に米印のように印刷し接着する. 印刷に必要なシステムの開発はおおた終了していたが, 図7の Stave 端にある冷却用のチューブと接着剤印刷のための針が干渉し 1 モジュール分の印刷ができない問題があった. そこでモジュールに接着剤を直接印刷し, Stave に載せる方法と曲げた針を用いて印刷する方法の 2 つ解決策が提案された. 私はこれらの解決策の検証をおこなった.

一つ目の解決策では Stave への搭載時の回転により接着剤の均一性が損なわれないかを確認する必要がある. この回転動作は 30 秒程度であるが, 搭載時の事故なども考慮して実験においては 5 分垂直に静置することで代替した. そこでガラスの上に接着剤を印刷し, 5 分

程度垂直に置いてから別のガラスを接着したテストサンプルを作成した。テストサンプルと5分程度垂直に置かずには作ったコントロールサンプルの接着剤の形を画像解析ソフト ImageJ を用いて図 8 のように比較した。

垂直静置により接着剤が流れた場合、ガラス接着後の接着剤のパターンが非対称になると考えられた。よって抽出した輪郭を用いて以下の式から輪郭の歪度を計算し、影響を評価した。ここで $f(x, y)$ は 2 次元の関数であり、 $(p+q)$ 次元のモーメントは (1) 式で表される [3]。

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \text{ and } \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{30} &= M_{30} - 3\bar{x}M_{20} + 2\bar{x}^2 M_{10}, \\ \mu_{03} &= M_{03} - 3\bar{y}M_{02} + 2\bar{y}^2 M_{01}. \end{aligned} \quad (3)$$

歪度の計算は画像解析における重心の計算やその高次式に従い (3) 式の μ_{03} と μ_{30} を評価パラメータとした。これは質量分布を書いた時、重心を中心したガウス分布の標準偏差に当たる [4]。測定結果は図 9 の通りで、5 分の垂直静置では印刷された接着剤パターンへの影響による歪みの影響は見られなかった。

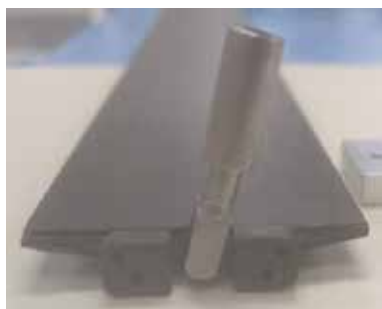


図 7: Stave を冷却するためのチューブ。これと接着剤を印刷するための 6 mm の針が干渉する。



図 8: ImageJ を用いた画像解析。左が取得した画像データ、中央が輝度を基準に接着剤と背景を分離し白黒画像に変換したもの、右が得られた白黒画像から輪郭を抽出したもの。

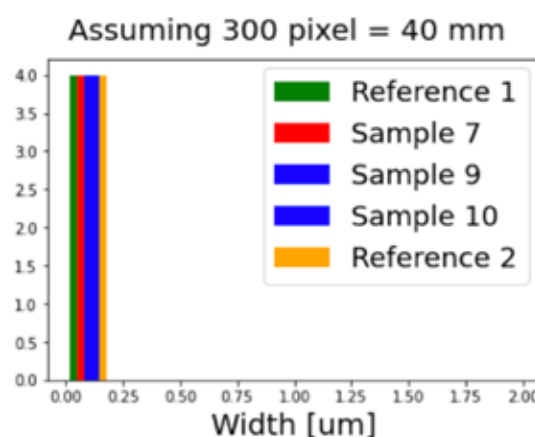


図 9: 歪みの測定結果。横軸は (μ_{30}, μ_{03}) のベクトルのノルムで歪みの大きさ、縦軸は印刷された接着剤の数を示す。Reference はコントロールサンプルを意味する。コントロールサンプルが複数あるのは異なる接着剤シリンジを使用したためである。Reference 1 と Sample 7, Reference 2 と Sample 9, 10 は同一のシリンジを用いて印刷した。

次に曲げた針を使ったテストをおこなった。現状の針は 6 mm と短いため、曲げることができない。そこでより長い 40 mm のものを用意し、それらを図 10 のように曲げた。まず曲げる前の針で $110 \mu\text{g}$ の接着剤を印刷するのに必要な針から接着剤を出すのに必要な圧力を比較した。針が長くなるにつれて圧力が高くなり、40 mm の針で 7.5 PSI^2 の圧力が必要になり、6 mm の時の 1.5 倍となった。圧力が高いと接着剤に穴が開きやすくシリンジの交換回数が増加するため、圧力が低くなるような工夫をする必要がある。元々は市販のプラスチック製の接合部を持つシリンジを使用していたが、曲げる際に折れやすかったため、針の部分を作成した。そこで図 10 のようにシリンジと針の接合部に使う密閉素材をゴムと金属の二種類用意して圧力を測定した。結果は図 11 の通りで、金属の方が必要な圧力は低かった。

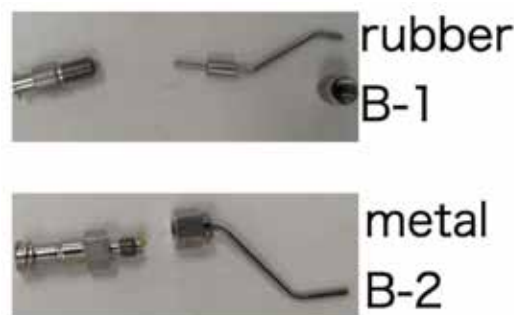


図 10: B-1 は密閉素材にゴムを使用し、B-2 は金属のみを使用した。

²Pound force per Square inch

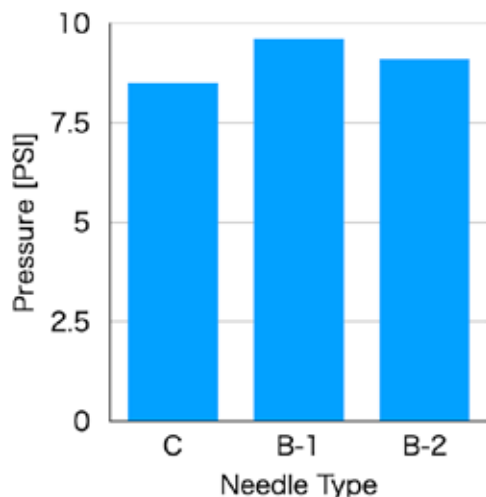


図 11: 密閉素材の違いによる圧力の比較. C は市販の針 (40 mm) を B-1, B-2 と同様に曲げた時の結果.

3 活動期間中の生活

今回はホームステイのように一般家庭の寝室を借りる方法で2ヶ月滞在した。最初に困ったのは移動手段で、滞在先からSLACまで行くのにバス停まで20分と遠く、本数も少ないことであった。そこで自転車を購入したのだが、期間中2回パンクしたりと大変だった。一方バスや電車での移動では自転車を載せるためのスペースがあり、日本よりも自転車での遠出に向いていると感じた。

渡航期間中にはアメリカ独立記念日があり、滞在先の方がパレードやホームパーティに連れて行ってくださった。パレードでは警察や軍、ゴミ収集車から地元のサッカーチームやクラシックカーの愛好家まで参加していた。またパレードに付随して屋台や服飾の市が立っており、市民のためのお祭りなのだと感じた。パレードの後のホームパーティでは近所の人が集まってメキシカンフードを食べながら談笑していた。おすすめの観光地や食べ物を教えてもらい、私も自分がどんな研究をしているかなどを話した。夜には打ち上げ花火が上がり、パーティーに来た子供たちも庭で花火をしていた。

4 今後の抱負

今回の研修を通して、普段の自分の研究で参加している Belle II 実験とは異なる実験に参加することができた。これにより普段の研究生活ではおこなうことのなかった画像解析やアイダイアグラムの測定方法などを知ることができた。今回の滞在では今後の研究で私自身の幅を広げてくれるよい経験になった。

所内に実験室や居室が分散している上、臨時の学生や技術者を含めた数多くのスタッフが所属し直接コミュニ

ケーションを取るのが大変な中、受け入れ先の教授である Charles Young 氏が頻繁に研究所内を周り学生やスタッフとコミュニケーションをとっている姿が印象的だった。加えて外で昼食やパーティーをしながら議論するなど、こまめにコミュニケーションを取る生活を送った。また居室で私の隣にいた博士学生の Jannicke Pearkes 氏の元にはひっきりなしに学生が訪れ、解析の手法などについて議論していた。今後は自分がこうした存在になれるよう、研究室のメンバーと今まで以上にコミュニケーションを取りたい。

謝辞

今回の渡航にあたっては数多くの人にお世話になりました。渡航前には指導教員や所属研究室の先生方にご理解いただき、大学の許可を得ることができました。COVID-19の影響で2年間渡航ができず Charles Young 氏には長期に渡りお忙しい中、受け入れを延期していただきました。また渡航中は Charles Young 氏だけでなく、本文で述べた研究を共におこなった Eric Miller 氏や Alex Wang 氏には根気強く実験にお付き合いいただいたことを感謝申し上げます。研究面だけでなく所内を案内していただいた Su Dong 氏や学生内でのイベントに積極的に誘っていただいた Jannicke Pearkes 氏にも感謝したいです。長橋なおみ氏にはアメリカでの生活で役立つ助言を数多くいただき、大きなトラブルもなく過ごすことができました。アメリカの生活に不慣れで迷惑をかけることもあったが、滞在先やそのご家族にも感謝を述べたいと思います。このほかにも受け入れ研究室のスタッフ、学生方には滞在期間中大変お世話になりました。ありがとうございました。最後に今回2ヶ月の長期に渡り送り出してくれた家族にも感謝したいと思います。

参考文献

- [1]ATLAS Collaboration, *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector*, ATLAS-TDR-030, CERN-LHCC-2017-021, 2017
- [2]Timon Heim, *Status of the ATLAS Inner Tracker Upgrade: Moving from Prototyping to the Production Phase*, Research Progress Meeting, 03/25/21
- [3]ImageJ <https://imagej.nih.gov/ij/> 10/06/22/アクセス
- [4]Joshua D. Martin, *Multivariate Moments to Characterize Nuclear Recoil Track Directionality in Low-Pressure TPCs*, degree of Bachelor(UNIVERSITY OF NEW MEXICO), 2015