

## ■ 研究紹介

# 高輝度 LHC に向けた ATLAS 検出器アップグレード

KEK 素粒子原子核研究所

中村 浩二

Koji.Nakamura@cern.ch

名古屋大学 大学院理学研究科

堀井 泰之

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

2018 年(平成 30 年)8 月 6 日

## 1 はじめに

スイス・ジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構(CERN)の Large Hadron Collider (LHC) は、地下約 100 m にある周長約 27 km のトンネルに建設された世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器である。2009–2012 年に、陽子・陽子系の重心系エネルギー 7–8 TeV で Run 1 のデータを取得した。2015 年から、重心系エネルギー 13 TeV の Run 2 データを順調に取得中で、2018 年 8 月現在、積分ルミノシティは  $100 \text{ fb}^{-1}$  を超えた。

2012 年のヒッグス粒子の発見 [1] 以来、結合定数、スピニ・パリティ、質量などの精密測定を行ってきた。Run 1 のデータを用いた解析で、発見時に確認されたグルーオン融合生成過程 (ggF), W ポソン, Z ポソンとの結合に加え、ベクターボゾン融合生成過程 (VBF),  $\tau$  レプトンとの結合を発見した [2]。Run 2 前半のデータを用いた解析の結果については、中浜氏の記事を参照いただきたい [3]。2018 年には、ループを介さない  $t$  クォークとの結合、 $b$  クォークとの結合を観測した [4, 5]。いずれの測定値も、標準理論の予測と無矛盾であった。また、前人未到のエネルギー領域で、標準理論を越える物理の探索を強力に推し進めている [3]。

ヒッグス粒子の精密測定、第二世代フェルミオンとの結合の発見、自己結合の発見、さらには標準理論を越える物理の発見にむけて、加速器および検出器を増強した高輝度 LHC 実験を 2026 年に開始する予定である。3000–4000  $\text{fb}^{-1}$  のデータ取得を目標として、加速器および検出器のアップグレードを推進している。ATLAS 検出器アップグレードに関しては、各構成要素に対する全 6 冊・全 2600 ページ程の技術仕様設計書が完成し、2018 年に CERN Research Board で承認された。

本稿では、高輝度 LHC における物理モチベーションを示した後、LHC アップグレード概要、ATLAS 検出器アップグレード概要を示す。その後、ATLAS 実験日本グループが推進するピクセル検出器改良、 $\mu$  粒子トリガー改良について、全体像と開発状況を示す。

## 2 高輝度 LHC における物理

高輝度 LHC では、圧倒的なデータ量を利用して、結合定数が小さい生成過程や高い運動量を持つパートンを必要とする生成過程による新物理探索の感度が向上する。また、ヒッグス粒子の精密測定、ヒッグス粒子の崩壊過程の発見、ヒッグス場の直接測定などが可能となる。

### 2.1 標準理論を越える物理

今までの LHC 実験のデータを用いた解析では、残念ながら標準理論を越える物理の兆候は見つかっていない。高輝度 LHC の重心系エネルギー 14 TeV は、現行の LHC 実験と大きく違わないが、高輝度によるデータ量の増加で、これまで感度がおよばなかった比較的生成断面積の小さい生成過程やパラメータ領域、特に電弱相互作用による新粒子生成過程に対して、発見可能な感度を持つ。一つの例として、Wino-like な長寿命チャージーノ粒子に対する質量–寿命平面上における制限を図 1 に示す。バンド付きの実線が  $3000 \text{ fb}^{-1}$  で期待される制限であり、左側が棄却される領域を示す。実線は、Run 2 における実データ解析の結果であり、発見感度が大きく向上することが分かる。

### 2.2 ヒッグス粒子の物理

すでに確認されたヒッグス粒子とほかの粒子の結合を精密に測定し、標準理論とのずれを探索することは、高輝度 LHC において非常に重要なタスクである。加えて、第二世代フェルミオンとの結合の発見（具体的には  $\mu$  粒子対に崩壊する過程の発見）、およびヒッグス粒子の自己結合の発見が、必要不可欠である。

ヒッグス粒子とフェルミオンおよびボソンとの結合定数の測定は、感度が大きく向上することが予測されてい

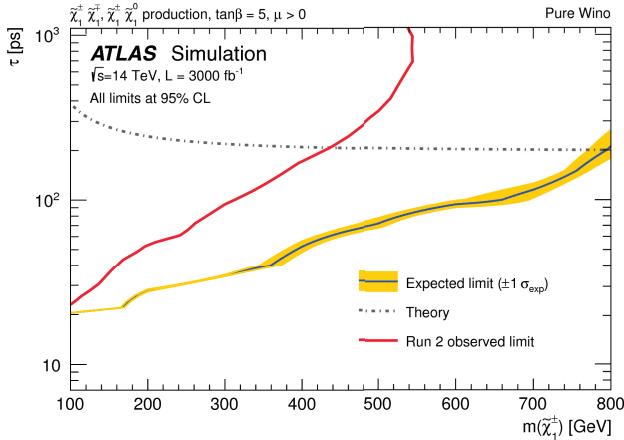


図 1: Wino-like な長寿命チャージーノの質量-寿命平面上における制限。Run 2 で得た制限および  $3000 \text{ fb}^{-1}$  の予測制限を示す。

る。高輝度 LHC 実験における結合定数の測定感度に関しては、参考文献 [6] を参照いただきたい。

$\mu$  粒子対に崩壊する過程は、高輝度 LHC の全データを用いると  $9\sigma$  を超える感度があり、信号の強度 (生成断面積と崩壊分岐比の積を標準理論で規格化したもの) は 14% の誤差で測定することが可能である [7]。

ヒッグス粒子自己結合の測定は、ヒッグス粒子の対生成過程を用いて行われる。支配的な過程は、図 2 に示す二つであり、自己結合 ( $\lambda_{HHH}$ ) が存在しない過程 (左) と存在する過程 (右) の干渉が  $\lambda_{HHH}$  の大きさによって異なる。ヒッグス粒子対生成の生成断面積を測定することで自己結合を測定できるが、標準理論におけるヒッグス粒子対生成の生成断面積は約  $40 \text{ fb}$  と小さく、さらに崩壊過程が多様であることから様々な終状態の解析を統合する必要がある。 $3000 \text{ fb}^{-1}$  のデータ量を仮定したシミュレーションの結果では、最も感度が高い過程の一つと考えられる二つのヒッグス粒子がそれぞれ光子対および  $b$  クォーク対に崩壊する過程の発見感度は  $1.05\sigma$  であり [8]、自己結合に対する制限は、95%信頼度で  $-0.8 < \lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM} < 7.7$  となる。更なる感度向上には解析の改善およびほかの崩壊過程の解析との統合が必要である。実データでの解析も行っていて、2017 年までに取得した  $27.5\text{--}36.1 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて行われたヒッグス粒子対生成の探索では、95%信頼度の上限値が、図 3 に示すように得られている。統合すると、標準理論の約 10 倍の生成断面積まで棄却されている。これらの解析は事象選択後の信号事象数が少なく統計誤差が支配的で、高輝度 LHC で取得可能な約 100 倍のデータを用いることで、約 10 倍の感度向上が期待される。最適化した解析でどこまで発見感度が上げられるかが、腕の見せ所である。

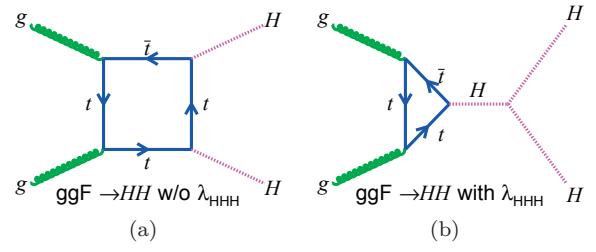


図 2: ヒッグス粒子対生成のファインマン図。

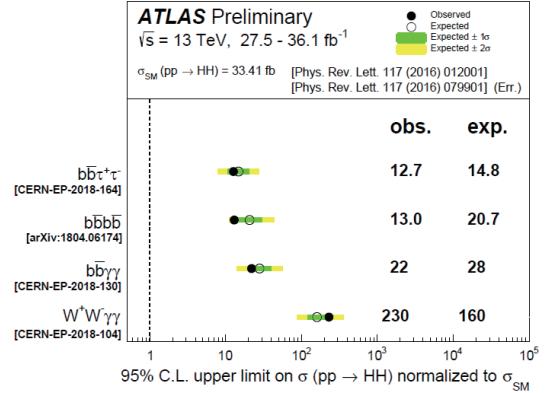


図 3: Run 2 データを用いて得られたヒッグス粒子対生成の生成断面積に対する上限値 (標準理論で規格化)。

### 3 LHC アップグレード概要

高輝度 LHC の陽子・陽子重心系エネルギーの設計値は、LHC の設計値と同じ  $14 \text{ TeV}$  である。一方、瞬間ルミノシティに対しては、最大で LHC 設計値の 7.5 倍 ( $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) を想定している。これは、ビーム電流を増強し、衝突点でのビームサイズを絞ることで実現する。ビームパラメータの設計値を、表 1 に示す。加速器アップグレードの詳細や日本グループの開発について、Preliminary Design Report [9] や中本氏の記事 [10] を参照いただきたい。

表 1: LHC および高輝度 LHC のビームパラメータの設計値。ルミノシティに直結する三つのパラメータを示す。

パラメータ	LHC	高輝度 LHC
ビーム電流 [A]	0.58	1.09
衝突点ベータ関数 [m]	0.55	0.15
規格化エミッタス [ $\mu\text{m}$ ]	3.75	2.50

瞬間ルミノシティ  $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  での運転が可能であれば、10 年ほどの運転で積分ルミノシティ  $4000 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得できる見込みである。これは、LHC の Run 3 の終わりまでに想定される  $300 \text{ fb}^{-1}$  の 13 倍に相当する。図 4 に、瞬間ルミノシティおよび積分ルミノシティのこれまでの経過および今後の予測を示す。

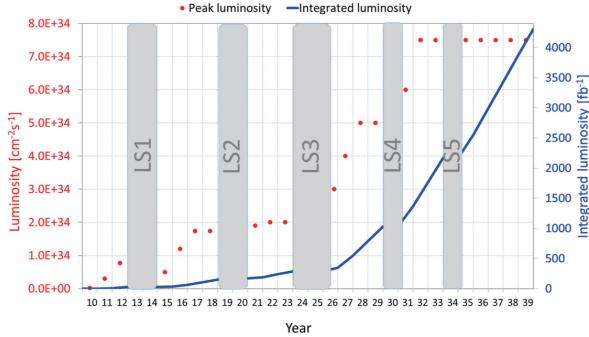


図 4: 最高瞬間ルミノシティ（点）、積分ルミノシティ（線）の経過および予測 [9]。高輝度 LHC の最高瞬間ルミノシティ  $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に対する想定を示す。

衝突バンチ数を増やさない単純な高ルミノシティ化では、一回の陽子・陽子交差あたりの反応事象数（パイルアップ事象数）が増加し、検出器の許容能力を超えてしまう。高輝度 LHC では、加速器の潜在的な最高瞬間ルミノシティ  $2 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を目指しつつ、実際の運転では挿入部の四極磁石などを調整することで、ルミノシティを平坦化（レベリング）する計画である。レベリングにより、検出器の負担を低減しつつ、積分ルミノシティを最大化できる。

## 4 ATLAS 検出器アップグレード概要

ATLAS 検出器は、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、 $\mu$  粒子検出器から成る。そのほかに、荷電粒子の飛跡を曲げるためのソレノイド磁石、トロイド磁石が存在する。トリガー・読み出しシステムが、保存する事象の高速選別および読み出しを担う。

LHC の高ルミノシティ化は、ヒッグス物理検証や新物理探索の可能性を拡張するが、一方で、検出器に対する要請はいっそう厳しくなる。ATLAS 実験では、積分ルミノシティ  $4000 \text{ fb}^{-1}$ 、最高瞬間ルミノシティ  $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、パイルアップ事象数 200 を想定し、検出器の改良を行う。

内部飛跡検出器は、高い放射線耐性を持ち細密化された新しい検出器に置き換える。カロリメータおよび  $\mu$  粒子検出器は、高輝度 LHC においても基本的に継続利用できる見込みであるが、ハドロンカロリメータの一部の PMT の置き換えや、検出領域の拡大を目的とした  $\mu$  粒子検出器の追加など、部分的改良を行う。トリガー・読み出しシステムは、より高い事象発生レートに対応した新システムに置き換える。

## 5 日本の貢献：ピクセル検出器

内部飛跡検出器は生成荷電粒子の運動量を測定することができるだけでなく、高輝度化によって多重陽子衝突数が増加した際、再構成された終状態粒子が同一衝突点から生成したことを見ることでパイルアップ由来の背景事象を大幅に削減することが可能である。高輝度 LHC に向けた高放射線耐性のある細密化されたピクセル検出器の開発について以下に述べる。

### 5.1 高輝度 LHC 用ピクセル検出器

現行の内部飛跡検出器であるピクセル検出器、ストリップ検出器、ガスチューブ検出器をすべてシリコン検出器（ピクセル検出器およびストリップ検出器）で置き換える。これに伴い、アップグレード用飛跡検出器（Inner Traker, ITk）[11] は、ピクセル検出器、ストリップ検出器とも現行の検出器の約 3 倍の面積を覆う必要がある。図 5 は ITk 検出器の断面図を示す。中央部の ITk ピクセル検出器は 5 層からなり、内層二層は 3D 型検出器、外層三層はプラナー型検出器からなる。

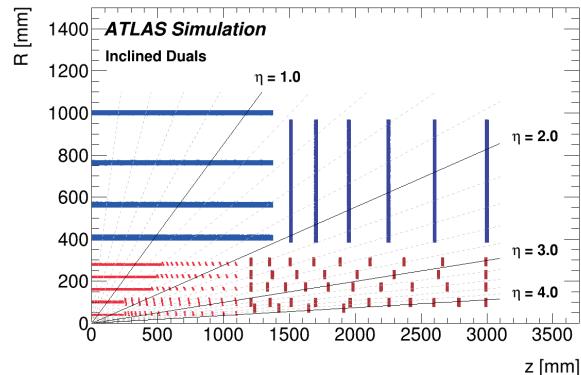


図 5: ATLAS 実験アップグレード用飛跡検出器の断面図。

高輝度 LHC 実験を想定した ITk ピクセル検出器に対する要求は厳しく、1 MeV 中性子換算で最内層では  $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 、3 層目では  $2.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  の粒子通過まで、また、最内層で 10 MGy、3 層目で 1.6 MGy の総電離線量まで運転が可能である必要がある（安全係数 1.5 を含む）。

ピクセルサイズは、高輝度に対応するためピッチを  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  または  $25 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  と現行の最内層のピクセルの 1/5 のサイズにする。検出器平面に対して斜めに通過する粒子は複数のピクセルにヒットを残すため、厚みを  $150 \mu\text{m}$  まで薄くすることでヒットの占有率を減らす。

## 5.2 プラナー型ピクセル検出器の開発

日本グループでは3層目から5層目に導入するプラナー型ピクセル検出器の開発を行っている。日本グループが開発している検出器の断面図及び平面図を図6に示す。主要な開発項目は、放射線耐性を考慮してバルク部の半導体をp型にしたこと、ピクセルサイズ細密化にともなう表面構造と高密度バンプ接合、高レートに対応する電子回路の技術にある。また、量産数が圧倒的に多いため、組み立ておよびインストールの方法の確立也非常に重要な開発項目である。以下、これらの改良点に関して解説する。

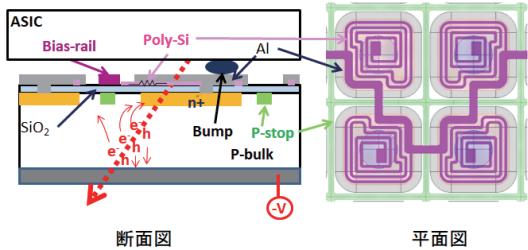


図6: プラナー型シリコンセンサーの断面図と平面図。

### 放射線耐性を考慮したp型半導体のセンサー

飛跡検出器に使用され、高エネルギー粒子検出器として用いられるシリコン検出器は非常に高抵抗なシリコンウェファーを用いて製造され、少量の不純物によってp型バルクもしくはn型バルクのセンサーとなる。現行ATLAS検出器に設置されているすべてのシリコン検出器はn型バルクである。これは、高品質で高抵抗なp型バルクのシリコンウェファーの入手が困難であったため、本来ならばp型バルクのセンサーの方が放射線損傷後の検出器の運転は簡易である。なぜなら、シリコン検出器は放射線の非弾性散乱によりバルク部に欠陥ができる、p型不純物と同等な性質を示すため、高い放射線環境下ではn型バルクのシリコン検出器は型変換をしてp型バルクの検出器へと変化する。この型変換に対応するために全空乏化電圧での運転が必要であったり、両面にわたる半導体プロセスが必要であったりと様々な工夫を強いられてきた。2000年代後半ごろになって質のよい高抵抗なp型バルクのシリコンウェファーが使用可能となり、放射線耐性などの基礎研究が可能となった。

当時Run 2終了後(2018年ごろ)インストール予定であったInsertable B-Layer (IBL) 検出器[12]に向けて浜松ホトニクス社と共同でp型バルクのピクセル検出器の開発を進めていたが、内部飛跡検出器の高輝度への対応や現行検出器寿命を考え、IBL検出器のインストールがRun 1終了後(2012-2014年)に早まり、日本グル

ープの開発はn型バルクのセンサーの量産ではなく将来の高輝度LHC実験のアップグレードへ向けたp型バルクのピクセル検出器の開発に進むことになった。

### ピクセルサイズ細密化に伴う表面構造の改良

シリコンセンサー単体の暗電流測定をする際、p型バルク(n<sup>+</sup>型電極)の場合、裏面に負の高電圧を印加し各電極を接地する必要がある。ピクセル検出器は電極が2次元的に配置されているため、センサー単体での暗電流を測定するにはすべての電極を接地するためにバイアス抵抗と呼ばれるポリシリコン製のネットワークをデザインする必要がある。各電極を接続しているため、クロストークを抑えるため大きな抵抗値が必要となり、その最適化に長い時間を要した。

浜松ホトニクス社で試作されたセンサーを東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター(CYRIC)にて高輝度LHCに相当する量の放射線を照射し、各ピクセル内部の検出効率の構造を評価するため、CERN研究所Super Proton Syncrotron (SPS)やフェルミ国立加速器研究所のメソンエリアにおいてビーム試験を行ない、結果を基に浜松ホトニクス社と共同で改善策を吟味するといった工程を繰り返し行った。

この過程で2012年ごろからバイアス構造が原因で放射線損傷後の検出効率が低下する問題、ピクセルサイズ細密化に対する対応など多くの課題があり一つずつ解決してきた。現在最有力なデザインは図6右に示すような渦巻き状にポリシリコン抵抗が配置されるものである。現在では放射線損傷後でも検出効率は99%を超えてアップグレード用の検出器として要求を満たすものが製造できている。

### ピクセルサイズ細密化に伴う高密度バンプ接合技術

二次元状に配置されたピクセルセンサーの電極をフロントエンド(FE)ASICに接続するために、SnAg製のバンプと呼ばれる技術を用いる。IBL検出器の量産の際、ドイツIZM社によってバンプ接合が行われたが、その歩留まりは低く、大きな問題となっていた。問題は大きく分けて二点あり、1) センサーおよびASICの反りを矯正するためのサポートウェファーを取り除く際の不良、2) バンプの接続を改善するために用いるフラックスの残留物によるショートであった。

日本グループは独自にバンプ接合技術を開発するため、浜松ホトニクス社に依頼し、サポートウェファーおよびフラックスを用いないバンプ接合技術の開発を行った。当初は図7左に示すように薄いセンサーに対するバンプ接合では接続されていないピクセル(白い部分)が多数存在することがあった。反りを矯正する吸着ジグの

改良, SnAg バンプとの接着を改善するためのセンサー側の金属膜 (Under Bump Metalization, UBM) の改良, 接着前の酸化膜除去法の改良などを行ない, 2015 年には IBL 検出器 (センサー厚 200  $\mu\text{m}$ ) よりも薄い 150  $\mu\text{m}$  厚のセンサーのバンプ接合をほぼ 100% の歩留まりで行うことが可能となった (図 7 右)。

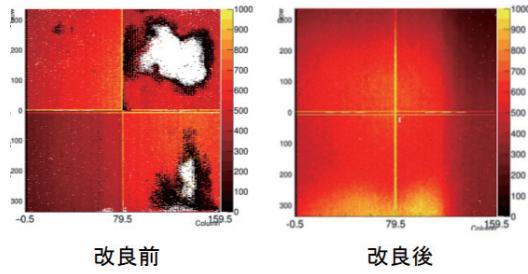


図 7: ベータソースを用いた, ピクセル検出器のバンプ接合の性能の改善前と改善後での比較。接続不良ピクセル (白い部分) がなくなり改善した。

### 高レートに対応する電子回路の技術

高輝度 LHC における飛跡検出器の単位面積あたりの粒子通過数は, 現行の運転時に比べはるかに多い。加えてピクセル細密化に伴い読み出しに必要なデータ転送速度への要求値は高くなる。現行の検出器では最大ひとつの FE ASIC あたり 160 Mbps のデータ転送を行っているが, 約 32 倍の高速転送 (5.12 Gbps/chip) に対応する必要がある。FE ASIC は CERN 研究所の RD53 コラボレーションによって開発されていて, 65 nm CMOS プロセスを用いた低ノイズな ASIC のプロトタイプを製作している。今までに実機に用いる 20 mm 角の ASIC(400×384 ピクセル) の半分のサイズのプロトタイプが完成し浜松ホトニクス社製センサーとのバンプ接合および読み出し試験を行っている。

一方, 高速転送に対応するのは ASIC だけではなく, フロントエンドから光信号に変換されるオプトボックスと呼ばれる変換ボードまで約 6m の距離で高速転送を維持する必要がある。5.12 Gbps のデータ転送自体は現在ではさほど速くはないが, 内部飛跡検出器中では, データ転送を行う差動線の数も多く, 物質量を限りなく小さくする必要性があり, 多層基板での転送やシールド付きのケーブルを安易に用いることができない。特に, 検出器の FE ASIC と直接接する基板は物質量の観点からフレキ基板を用いる。両面基板でインピーダンス整合を考慮したフレキ基板を日本グループで設計し, プロトタイプを製作した (図 8)。カーボンファイバ製の構造体に, FE ASIC を 4 枚搭載したモジュール (Quad モジュール) を 7 台取り付けた最初のデモンストレータ (図 9) が完

成した。内 6 台のフレキ基板および 2 台のモジュールは日本製である。現在では実際のピクセル検出器の 3 層目と 4 層目に相当する 1.6 m の構造体を製作するデモンストレータを制作中で日本グループも多大な貢献をしている。

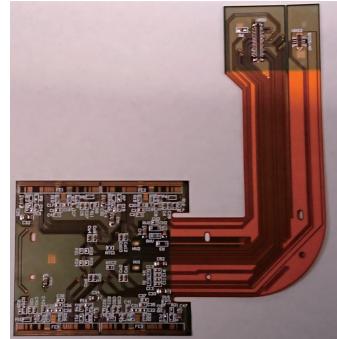


図 8: 日本グループでデザインしたフレキ基板。フロントエンド ASIC 4 台搭載したモジュールに用いる。



図 9: 実モジュールデモンストレータ。カーボンファイバ製の構造体にフレキ基板が接着されたピクセルモジュールをインストールした。右から二番目を除く 6 台のモジュールに搭載されているフレキ基板は日本製で, 左の二台には浜松ホトニクス社製のモジュールが使われている。

### 大量生産に向けた組み立て技術の開発

先に述べたように, 高輝度 LHC 実験に向けた ITk アップグレード検出器は現行検出器と比較して量産数が多い。浜松ホトニクス社でバンプ接合されたモジュールにフレキ基板を接着し, ワイヤーボンドで接合する一連のアセンブリを安価にかつ高い歩留まりで行う必要がある。図 10 に示す治具を用いて, モジュールおよびフレキ基板を吸着し, ガイドポールにそって下ろして接着することで繰り返し精度が 30  $\mu\text{m}$  程度で接着可能となった。また, アセンブリを行う際に使用する接着剤に関して高い放射線耐性が要求されるため, 放射線損傷後のピール試験を行ない接着剤の選定も進めている。

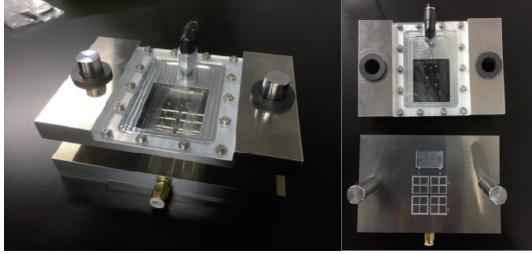


図 10: フレキ基板とモジュールを接着するアセンブリ治具。右上の治具でフレキ基板を吸着、右下の治具でモジュールを吸着し、左図のようにガイドポールに沿って下ろすことで精度よく接着を行う。

### 5.3 シリコン検出器のまとめ

高輝度 LHC 実験に向けたシリコンピクセル検出器の開発を行ってきた。要求を満たす検出器が完成し、今後は構造体を含めたプロトタイプの製作や量産準備へと移行していく時期に入る。日本グループとして約 2000 台の Quad モジュールの製造およびフレキ基板とのアセンブリを担当する予定であり内部飛跡検出器の製造に多大な貢献を果たしている。

## 6 日本の貢献: $\mu$ 粒子トリガー

### 6.1 $\mu$ 粒子トリガー改良の概要

ATLAS 実験のトリガーでは、低エネルギーのパートンの反応に由来する背景事象を抑制し、興味のある反応のデータを効率的に取得するために、閾値を超える横運動量  $p_T$  を持つ粒子を含む事象を選択する。閾値を上げると、読み出しシステムへの負荷は小さくなるが、物理事象に対するアクセプタンスが減少するため、適切な閾値を設定することが重要である。

われわれは、高輝度 LHC に向けて、トリガー・読み出しシステムの大改良を行う。現行システムが持つ前段トリガーレート 100 kHz、同レイテンシ 2.5  $\mu$ s の制約を、それぞれ 1 MHz、10  $\mu$ s に拡張する。また、ソフトウェアベースの後段トリガーのレートを、1 kHz から 10 kHz に拡張する。改良により、荷電レプトンに対する閾値は、高ルミノシティ環境下においても Run 1 と同等の 20 GeV 程に抑えることができる。

新しいシステムを実現するためには、 $\mu$  粒子検出器の電子回路は、一部の前段回路を除き、すべて入れ替える必要がある [13, 14]。入れ替えに際し、前段トリガーの主要検出器であるバレル部の Resistive Plate Chamber (RPC) 検出器、エンドキャップ部の Thin Gap Chamber (TGC) 検出器のコインシデンスベース判定を飛跡再構成ベース判定に改良する。また、Monitored Drift Tube

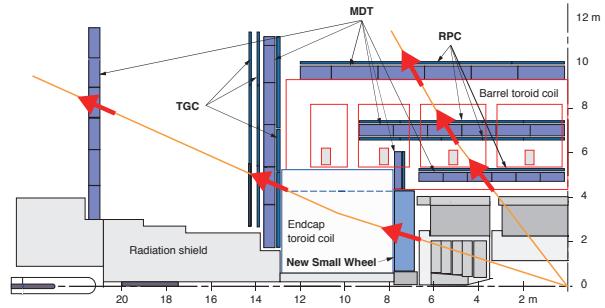


図 11: 高輝度 LHC における ATLAS 実験  $\mu$  粒子前段トリガー概要。複数箇所で直線飛跡を再構成し、位置と角度の相関を用いて、トロイド磁場での飛跡の曲がり具合を導出し、運動量を得る。

(MDT) 検出器の信号を新たに導入する。運動量分解能を最高で 6%ほどに改良する。図 11 に、模式図を示す。

日本グループは、TGC 検出器の電子回路改良の全数を、責任を持って行っている。また、MDT 検出器の電子回路改良を、アメリカやドイツの研究機関と協力して進めている。さらに、後段トリガーの  $\mu$  粒子再構成にも主要な貢献を果たしている。以下に、電子回路改良についての概要を示す。

### 6.2 TGC 検出器回路の改良

TGC 検出器（図 12 左）は、ワイヤー間隔 1.8 mm の多線式比例計数管である。ドリフト時間が短く、各  $\mu$  粒子に対応する陽子・陽子交差（25 ns 間隔で起こる）の識別が可能であり、 $\mu$  粒子トリガーの主検出器の一つとして利用される。

図 12 右は、高輝度 LHC 向けの TGC 検出器のトリガー・読み出し回路の全体像を示す。検出器に取り付けられている Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) ボードを除き、すべてのボードを入れ替える必要がある。これまでのシステムでは、全七層のヒットのコインシデンスを、前段、後段に設置される ASIC や FPGA を用いて段階的に取ることで、トリガー判定を行っていた。新しいシステムでは、近年の高速転送技術の発展を生かし、すべてのヒット情報を後段に集約し判定を行う。

ASD ボードでデジタル化した信号は、検出器の構造体に設置される PS ボードに送られる。PS ボード上の ASIC で、飛行時間やケーブル長の違いを吸収し、各ヒットが一つの陽子・陽子交差にアサインされる。それらの信号は、FPGA が収集し、後段回路に転送される。一つの PS ボードは、256 チャンネルの信号を、合計約 20 Gbps の転送レートで後段に送る。2016 年に試作機を作成し（図 13），高速転送のコンセプトを検証した。

PS ボードが送信した全ヒットの情報は、回路室に置

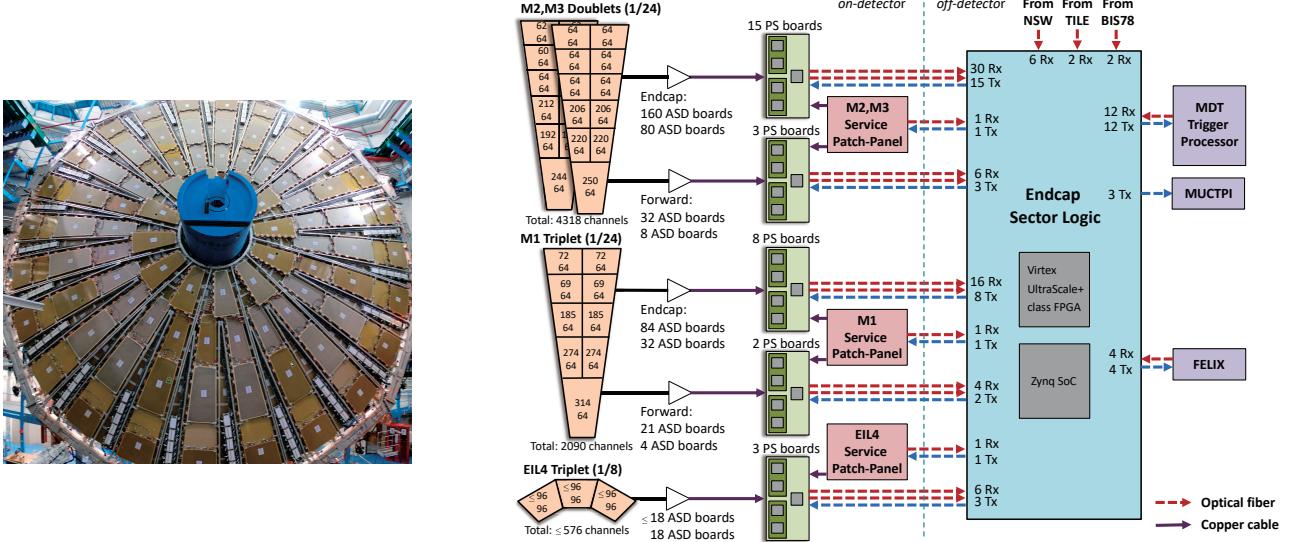


図 12: TGC 検出器の写真（左図）および高輝度 LHC 向け TGC トリガー・読み出し回路の全体像（右図）。前置回路（PS ボード）から光ファイバーですべてのヒットの情報を後段回路（Endcap Sector Logic ボード）に送り、前段  $\mu$  粒子トリガー判定および読み出しを行う。

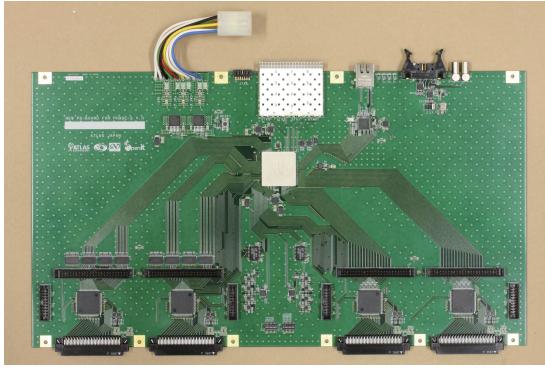


図 13: 高輝度 LHC 向けの TGC 検出器の前置回路（PS ボード）の試作機の写真。256 チャンネルの信号を約 20 Gbps の転送レートで後段回路に送る。

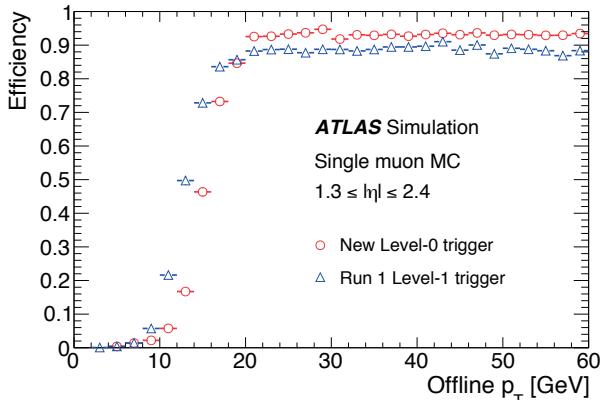


図 14: TGC 検出器を用いた  $\mu$  粒子トリガーの検出効率の横運動量  $p_T$  依存。Run 1 のシステム（三角印）および高輝度 LHC で想定するシステム（丸印）に対する分布を示す。閾値 20 GeV を想定する。

かれる Endcap Sector Logic ボードに送られる。Virtex UltraScale+ クラスの FPGA がそれを集約し、トリガー判定を行う。すべてのヒットを一括して扱える利点を生かし、パターンマッチングによる飛跡再構成を行うことで、閾値以上の横運動量を持つ  $\mu$  粒子に対する検出効率を数%向上させ、閾値以下の  $\mu$  粒子をより削減する（図 14）。現在、ロジックの詳細デザインを構築中であり、2020 年を目処に試作機を製作する。

TGC 回路改良に関する今後の重要な課題の一つは、放射線環境下での運転を見据えた FPGA の選択およびその運用法の確立である。ザイリンクス社の Kintex-7 FPGA は、総電離線量に対する耐性が相対的に高いが、シングルイベント耐性が低いため、ソフトエラー抑制機能を要する。マイクロセミ社のフラッシュベースの PolarFire FPGA は、シングルイベント耐性が相対的に高いが、総電離線量に対しては検証を要する。もう一つの重要な課題は、Endcap Sector Logic ボードのデザイン構築である。一枚のボードに、約 100 対の光送受信機をどのように設置するか、それらの信号をいかに FPGA 内部で処理するかが鍵となる。

### 6.3 MDT 検出器回路の改良

MDT 検出器は、直径 30 mm のドリフトチューブ型検出器であり、現行の ATLAS 実験においては、精密運動量測定用に用いられ、前段トリガーでは用いられていない。高輝度 LHC では、MDT 検出器を前段  $\mu$  粒子トリガーに導入することで、トリガーにおける横運動量分解能を向上させ、閾値を下回る横運動量を持つ  $\mu$  粒子の

寄与を抑制する。

日本グループは、FPGA を用いたドリフト時間計測器、Associative Memory (AM) チップを用いた飛跡再構成回路を提案している。それぞれ、時間計測器および飛跡再構成回路の候補の一つとして、技術仕様設計書に記載されている [13, 14]。前者の説明は参考文献 [15] に譲り、以下では、後者を簡潔に説明する。

MDT 検出器の各チューブに対するドリフト時間をドリフト距離に焼き直し、飛跡を再構成する（図 15）。前段トリガーで利用するためには、高速処理が求められるため、精密運動量測定用のビン幅 0.78 ns に比べて荒いビン幅 12.5 ns を用いる。AM チップには、あらかじめ、各チューブのドリフト距離のリストと、それに対応する飛跡の情報を保存しておく。この情報を用いて飛跡を再構成する。図 16 は、AM チップによる MDT 飛跡再構成のシミュレーション結果を示す。AM チップで構成できる現実的パターン数で高い検出効率を得られることがわかった。現在、ハードウェアを用いた動作検証を行うために、準備を進めている。

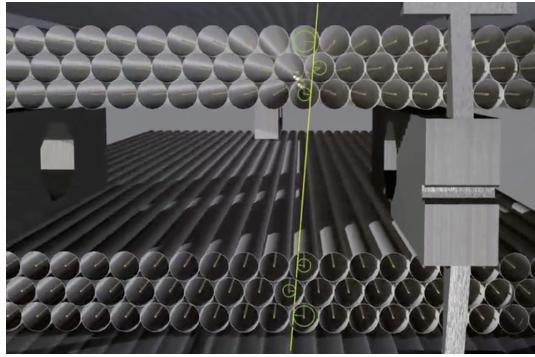


図 15: MDT 検出器における飛跡再構成の模式図。各チューブに対して測定されるドリフト半径を元にする。

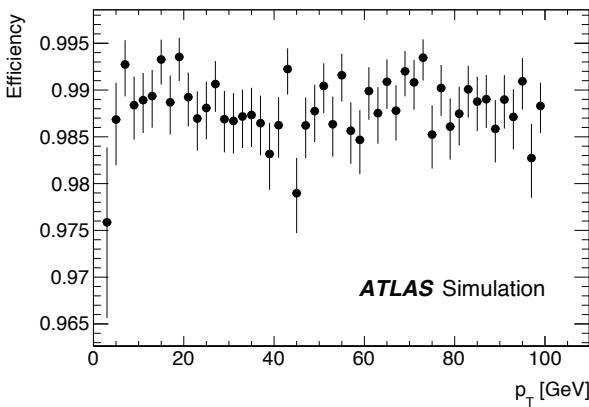


図 16: AM チップによる MDT 飛跡再構成のシミュレーション結果。検出効率を横運動量  $p_T$  に依存して示す。

## 7 おわりに

今後 15–20 年の高エネルギー物理学を考えると、電弱スケールにおける測定・探索を追求し、より高エネルギーの物理を俯瞰することが重要であり、直接的研究が可能な実験は高輝度 LHC のほかにはない。高輝度 LHC は、エネルギー・フロンティアの素粒子実験を牽引する加速器である一方で、検出器への要求は厳しく、ATLAS 検出器のアップグレードは、最先端の技術を要する。中でも重要な内部飛跡検出器、 $\mu$  粒子トリガーのアップグレードを日本グループが牽引している。過酷な環境での運転を実現する検出器構築は挑戦的であるが、そういった最先端の研究に携われることは非常に魅力的である。

## 参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
- [2] The ATLAS and CMS Collaboration, JHEP **08**, 045 (2016).
- [3] 中浜優, 高エネルギーニュース **37-1**, 37 (2018).
- [4] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **784**, 173 (2018).
- [5] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2018-036, Jul. 2018.
- [6] The ATLAS Collaboration, ATL-PHYS-PUB-2014-016, Oct 2014.
- [7] The ATLAS Collaboration, ATL-PHYS-PUB-2018-006, May 2017.
- [8] The ATLAS Collaboration, ATL-PHYS-PUB-2017-001, Jan. 2017.
- [9] G. Apolinari, I. Béjar Alonso, O. Brüning, M. Lamont, and L. Rossi, CERN-2015-005, Dec. 2015.
- [10] 中本建志, 高エネルギーニュース **34-3**, 185 (2015).
- [11] The ATLAS Collaboration, CERN-LHCC-2017-021, ATLAS-TDR-030, Sep. 2017.
- [12] 生出秀行, 田窪洋介, 高エネルギーニュース **33-2**, 61 (2014).
- [13] The ATLAS Collaboration, CERN-LHCC-2017-017, ATLAS-TDR-026, Sep. 2017.
- [14] The ATLAS Collaboration, CERN-LHCC-2017-020, ATLAS-TDR-029, Sep. 2017.
- [15] Y. Sano *et al.*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, **874**, 50–56 (2017).