

## II. 素粒子実験グループ

教授	受川 史彦
准教授	武内 勇司
講師	佐藤 構二
助教	飯田 崇史, 廣瀬 茂輝
特命教授	金 信弘
研究員	原 和彦
大学院生	17名
学群4年次生	4名

素粒子実験グループは陽子衝突型加速器 LHC を用いた国際共同実験 ATLAS に参加し、エネルギー・フロンティアでの素粒子実験研究を遂行している。また、宇宙背景ニュートリノ探索実験 COBAND のための高分解能光検出器 STJ の開発、LGAD や CMOS 技術を用いた次世代半導体粒子検出器の開発、ニュートリノのマヨラナ性を探る実験のためのシンチレータの開発などの検出器開発を行っている。本グループの教員は宇宙史研究センターにも所属し、国内外の機関との連携を深めた研究を強力に推進するための組織整備を行っている。

### 【1】 LHC ATLAS 実験

欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突型加速器である。本研究室では、LHC 実験でデータを取得している ATLAS 実験に参加して来た。LHC で陽子・陽子衝突を測定している ATLAS と CMS 両実験は、2012 年にヒッグス粒子を発見した。その後も LHC 加速器は運転を続け、ヒッグス粒子や標準理論の精密測定、新物理の探索などさまざまな素粒子物理の研究を続けて来た。今後も、加速器と検出器をアップグレードしながら 2030 年代まで稼働を続け、より高い精度での研究を行う計画である。

LHC 加速器と ATLAS 実験は、2019 年から 2021 年にかけて 3 年間シャットダウンし、高輝度化のためのアップグレードを行った。2022 年からは、新たな Run-3 運転期間が始まった。Run-3 は、重心系エネルギー 13.6 TeV で衝突実験を開始し、2025 年までの 4 年間で  $250 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得する計画である。Run-3 運転終了後は長期シャットダウンを再度行い、2029 年からは現在よりも瞬間輝度を 2.5 倍に高輝度化した HL-LHC 実験を開始する。

2023 年度には、2015 年から 2018 年までの Run-2 で得られていたデータを用いた様々な物理解析が進んだ。同時に、Run-3 の運転により新しく得られたデータの解析も始まり、すでにいくつかの物理結果を公表した。ここでは、2023 年度に公表された中から、もっとも興味深い物理成果のうちのいくつかを紹介する。筑波大学グループでは、シリコンストリップ検出器の運転を行っており、また 2029 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発も行って来ている。

#### (1) LHC-ATLAS 実験の現状と将来計画

2011-2012 年の Run-1 実験では、重心系エネルギー 7~8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。Run-1 後も LHC は、2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年から

2018年のRun-2実験では、重心系エネルギーを13 TeVに上げて衝突実験を行った。Run-1では7 TeV、8 TeVのデータをそれぞれ $4.57 \text{ fb}^{-1}$ 、 $20.3 \text{ fb}^{-1}$ 、Run-2では13 TeVのデータを $139 \text{ fb}^{-1}$ 取得した。

2022年7月には、重心系エネルギー13.6 TeVでRun-3の物理Runが開始した。図1にATLAS実験の運転状況を示す。2023年6月現在で、Run-3運転において $94 \text{ fb}^{-1}$ をATLAS検出器は記録した。Run-3では、バンチごとの陽子数をRun-2時よりも増加させたため、バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突反応数も増加した。

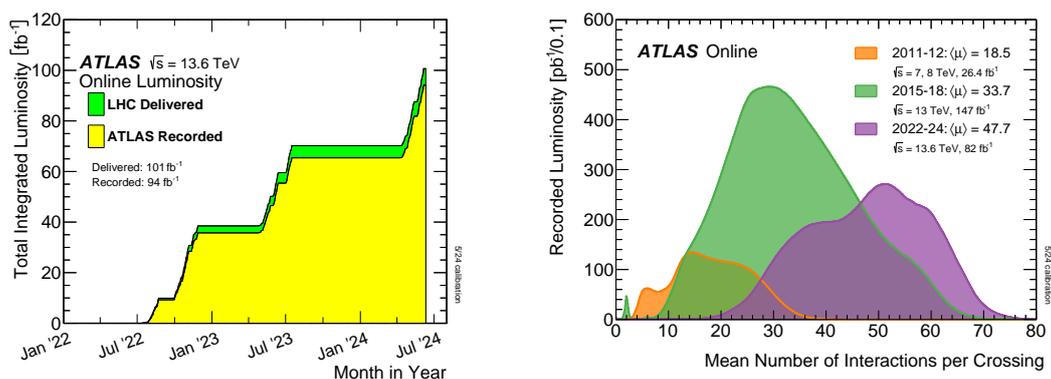


図 1: ATLAS 実験のデータ取得の状況。(左) 加速器が配った積算輝度と、ATLAS 検出器で記録した積算輝度の推移。(右) バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突の反応数の分布。Run-1, Run-2 との分布を比較のために重ねて表示している。

今後は、2025年までRun-3実験を続行し、 $250 \text{ fb}^{-1}$ の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2026-2028年には、再び加速器と検出器のアップグレードが予定されており、2029年からは瞬間輝度をRun-3の2.5倍に上げるHL-LHC実験が開始される。HL-LHC実験は、10年間かけて $3000 \text{ fb}^{-1}$ の大規模データセットを取得する計画である。

## (2) ヒッグス粒子の精密測定

2012年にATLASとCMS両実験でヒッグス粒子が発見されて以来、両実験ともヒッグス粒子のさまざまな性質を精度を上げながら測定してきた。図2に、ヒッグス粒子のさまざまな過程での生成断面積と崩壊分岐比の測定結果を示す。

ヒッグス粒子の重要な性質は、フェルミオンとの湯川結合の強さがフェルミオン質量に比例すると標準理論で予言されていることである。また標準理論によると、ゲージ粒子は、電弱対称性が破れる際に質量を獲得したのであり、そのヒッグス粒子との結合が標準理論通りであるかどうかを検証することは意義深い。図3にヒッグス粒子とさまざまな粒子との間の結合の強さの測定結果を示す。Run-2データを解析することで測定精度が上がってきたが、いまのところ測定結果は標準理論とよく一致している。

ATLAS実験では、ヒッグス粒子の生成断面積だけでなく、運動学的な領域ごとの生成頻度も測定している。LHCで生成されたヒッグス粒子はさまざまな終状態に崩壊するが、1つの終状態だけでは事象が少ないところを、いろいろな終状態を統一的に解析することで運動学的領域ごとの生成断面積を測定することに成功している(図4)。この結果もいまのところは標準理論とよく一致している。

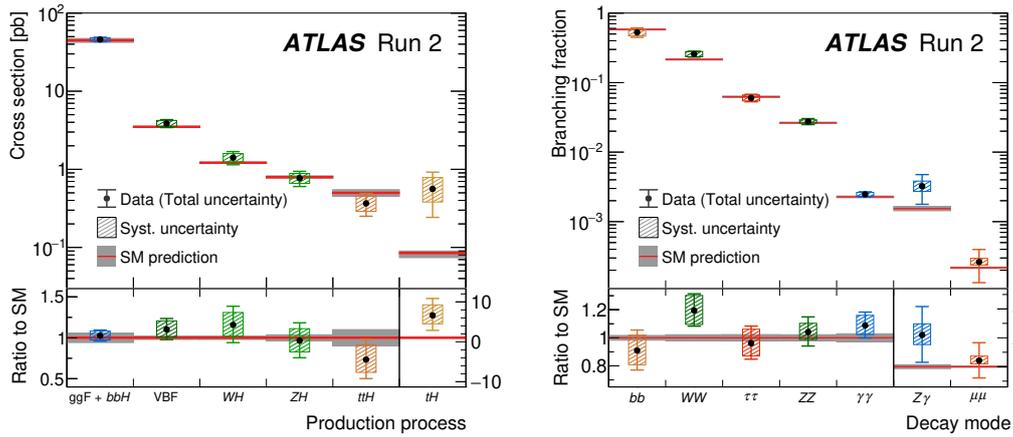


図 2: さまざまな過程でのヒッグス粒子の (左) 生成断面積と (右) 崩壊分岐比の測定結果。

### (3) ヒッグス粒子が2個同時に生成される過程の探索

ヒッグス粒子が2つ同時に生成される事象は、LHC では図5に示す生成過程が考えられる。標準理論通りであれば左と中の2つの過程が混ざりあって生成するが、こうした事象を発見し精密に測定することでヒッグス粒子の自己相互作用を測定できる。一方で、標準理論を超える理論では、ヒッグス粒子2つに崩壊する重い新粒子を预言する理論も多い。そうした新粒子が存在すれば、2ヒッグス事象は標準理論の预言する頻度よりもはるかに頻繁に起こりうる。

ATLAS 実験 Run-2 のデータを使用し、ヒッグス粒子が2つ同時に生成される事象を  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ 、 $HH \rightarrow VV V' V'$  ( $V, V'$  は、 $Z$  または  $W$  ボソン)、 $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$  の各崩壊モードで探索した。データ内に有意な信号の寄与が確認されなかった。これら解析で得られた2ヒッグス生成事象の生成断面積の上限値を標準理論の预言値で規格化して示したのが図7(左)である。3つの解析チャンネルをコンバインした結果の上限は、標準理論の値の2.9倍まで迫ってきている。標準理論では、図5の左図と中図の過程が混ざりあって2ヒッグス事象は生成されるが、ヒッグス粒子の自己結合の強さ( $\lambda$ )によってこの混ざり具合が変わり、事象の特徴にも違いが生まれる。図7(右)は、さまざまな自己結合 $\lambda$ を仮定したときに得られた2ヒッグス過程の生成断面積に対する上限を示している。自己結合の値の標準理論値との比  $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM})$  に対する95%信頼区間は、 $-1.2 < \kappa_\lambda < 7.2$  である。

Run-3 とそれに続く HL-LHC で多くのデータを蓄積し、2ヒッグス事象を発見し、ヒッグス粒子の自己相互作用の測定を行うことは、標準理論の新しい一面を検証することになるため重要である。

重い粒子が崩壊する過程で、すでに発見されている  $125 \text{ GeV}/c^2$  ヒッグス粒子2つが同時に生成される物理過程も ATLAS 実験では探している。図6に、ヒッグス粒子対に崩壊する重いスカラー粒子の探索結果と、それによる hMSSM シナリオに対する棄却域を示す。

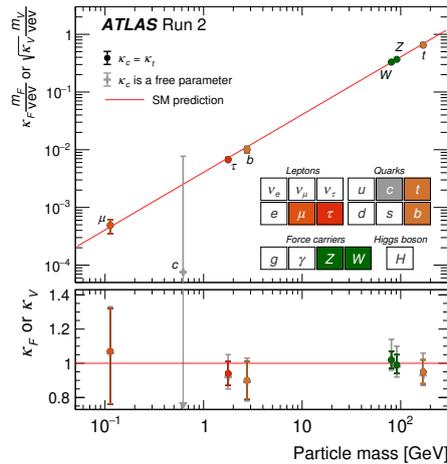


図 3: ヒッグス粒子のさまざまな粒子との結合の強さの測定結果。さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

#### (4) 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

標準理論では、ヒッグス場としてアイソスピン・ダブレットを1個導入し、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。ヒッグス場にアイソスピン・ダブレット2個を導入する2HDMモデルは、興味深い素粒子理論として取り上げられることが多い。有望視されている超対称性理論でも、ヒッグス・ダブレットを複数導入する必要がある。最小限の超対称性理論であるMSSM (Minimum Supersymmetric Standard Model) でも、2個のヒッグス・ダブレットを導入する。LHCでの標準理論を超えるヒッグス粒子探索では、2HDMやMSSMのさまざまなシナリオを考えて研究を行う場合が多い。

2つのヒッグス・ダブレットを導入するMSSMでは、3つの荷電中性なヒッグス粒子 $h$ 、 $H$ 、 $A$ と正と負の荷電を持ったヒッグス粒子 $H^+$ 、 $H^-$ の計5つのヒッグス粒子が予言されている。これまでの実験データとの整合性から、すでに発見されている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子は $h$ である可能性が高く、他の4つのヒッグス粒子は $h$ よりも重い可能性が高い。ATLAS実験におけるさまざまな重いヒッグス粒子の直接探索解析によって得られた $h_{\text{MSSM}}$ シナリオに対する棄却領域をまとめたのが図8である。

## 【2】 ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループは、ATLAS シリコンストリップ検出器 (SCT) の建設およびその後の検出器運転において、重要な貢献を継続してきた。これまで10年以上にわたってLHCの厳しい実験環境下で運転されてきたSCTセンサーは、大きな放射線損傷を受けており、例えば漏れ電流は運転開始当初の約10,000倍にまで増加している。SCTはLHC Run 3 運転期間 (2022–2025) 終了時まで、荷電粒子の飛跡検出や運動量測定に必須な検出器であるため、Run 3 運転期間においてはこれまで以上に慎重に検出器の状態を監視しながら運転する必要がある。

ATLAS Run 2

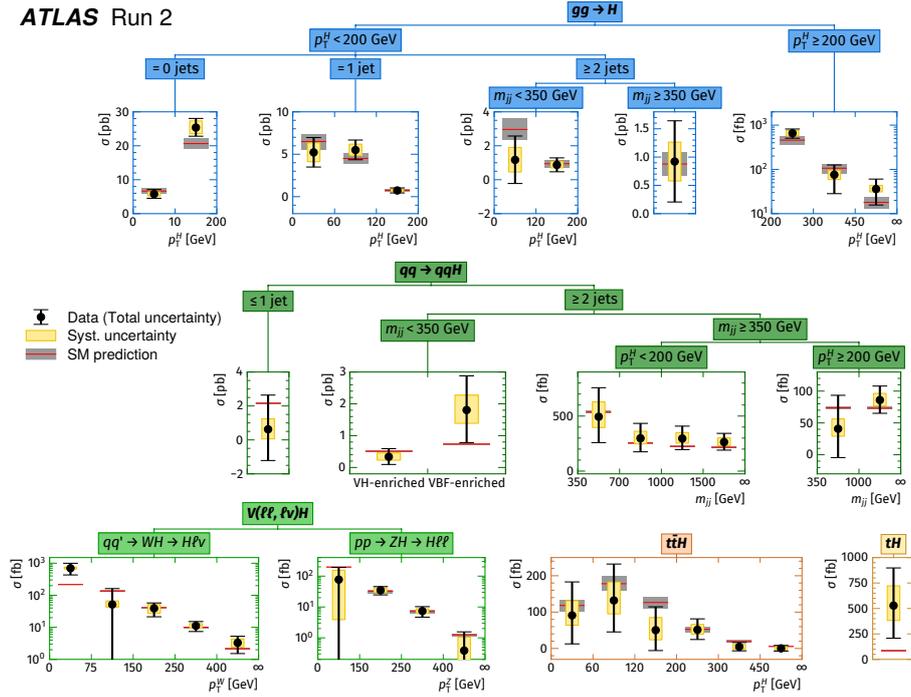


図 4: ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

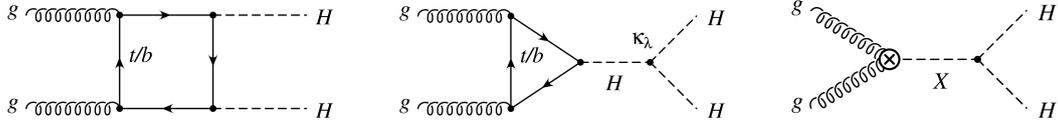


図 5: LHC でのヒッグス粒子 2つが同時に生成される物理過程。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子  $X$  が 2つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

2023 年は、前年 ( $35.7 \text{ fb}^{-1}$ ) を 2 倍以上上回るデータを取得するべく、4 月より本格的なデータ収集を開始した。データ収集の立ち上げから 7 月半ばまでは非常に順調であったが、7 月 17 日に LHC 超電導マグネットのクエンチが発生した際に、LHCb 検出器付近の Inner Triplet<sup>1</sup>において、マグネット冷却用のヘリウムが断熱容器内に漏れるという事故が起きた。幸いにしてヘリウムの外部への漏洩はなくすべて回収でき、またマグネット間をつなぐベローズ部にあった亀裂が早期に特定されたのであるが、部品交換などのために、普段は 1.9 K で運転されているマグネットを一度室温まで戻さなければならず、完全復旧に約 6 週間を要した。結局、2023 年の陽子陽子衝突データの収集は打ち切りとなり、今年の取得データは前年を下回る  $29.7 \text{ fb}^{-1}$  にとどまった (なお、9 月以降は重イオン衝突データを取得した)。

SCT については、放射線損傷の影響が顕著になりつつも安定な運用を継続した。放射線損傷に限らず、随所に経年劣化の影響が顕れ始めており、LHC 運転休止期間を利用した部品やデータ処理用ボードの交換、また年末には水漏れを起こした電源ラック冷却用熱交換器の交換を行った。SCT が出すエラーの頻度も増加傾向にある。エラーの頻度が高くなると、正しくデータを取得できなくなったり、最悪の場合は SCT がビジー信号を発出することで、

<sup>1</sup>LHC 衝突点直前に置かれている、陽子ビームを衝突点に向けて収束させるための 3 連の四極電磁石群のこと。

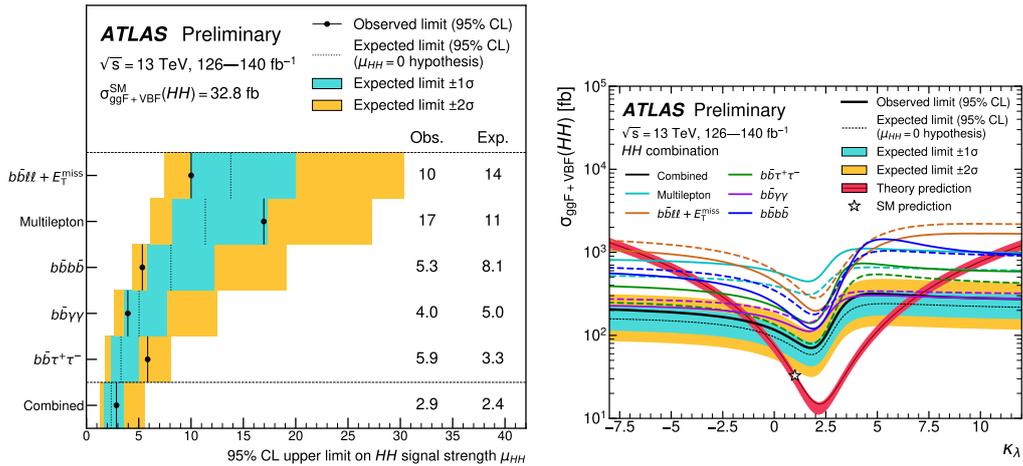


図 6: (左) 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) さまざまな自己結合を仮定したときに得られた 2 ヒッグス事象の生成断面積に対する上限。自己結合の値は、標準理論の値との比  $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{\text{SM}})$  で表示している。

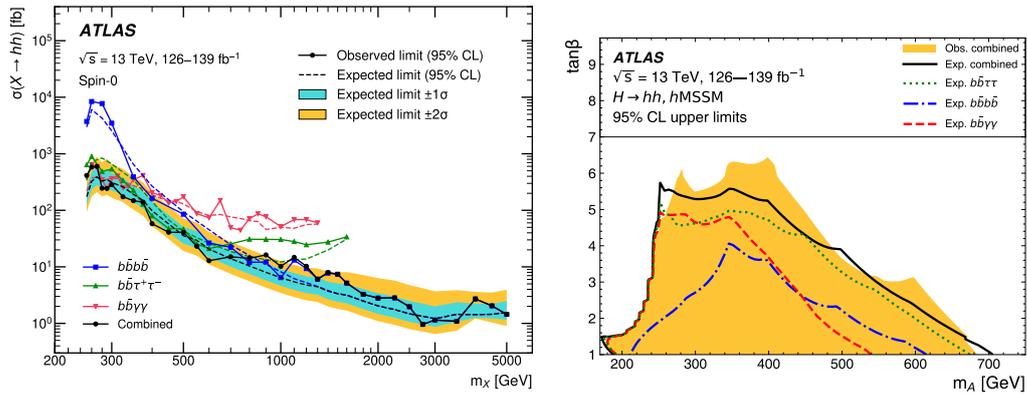


図 7: (左) 2 つのヒッグス粒子に崩壊する新粒子の質量の関数として得られた生成断面積に対する上限値。(右) 2 つの  $125 \text{ GeV}/c^2$  ヒッグス粒子に崩壊する重い粒子の探索結果から得られた、hMSSM シナリオに対する棄却域。

ATLAS 検出器全体のデータ収集を止めてしまうため、注視が必要である。

シリコン検出器に対する放射線損傷が顕著になると、ノイズが増加する。SCT の DAQ システムで許容されるデータ転送量は、各モジュールからバックエンドにある readout driver (ROD) までをデータ転送する「FE リンク」で 40 Mbps、ROD から ATLAS 全体の DAQ までを転送する「S リンク」で 1.28 Gbps に制限されるため、データ転送量がそれを超えると SCT がエラーやビジー信号を出す。したがって、SCT から送出されるデータ転送量が、その上限よりも十分に低いことを確認しておく必要がある。SCT のデータサイズは DAQ 上でリアルタイムにモニターされているが、データの記録間隔は数秒程度で、ATLAS 検出器のハードウェアトリガーレート (約 100 kHz) と比べて格段に遅い。一方でデータ転送量は SCT が記録したヒット数 (荷電粒子由来のものだけでなく、ノイズによるヒットも含む) でほぼ決まるため、記録されたヒット情報から逆算してより正確に見積ることができる。その結果を図 9 に示すが、パイルアップ<sup>2</sup>が高い領域まで精度の良いデータ転送量見積

<sup>2</sup>LHC の陽子バンチ同士が 1 回交差する際に同時に起こる陽子陽子衝突数。

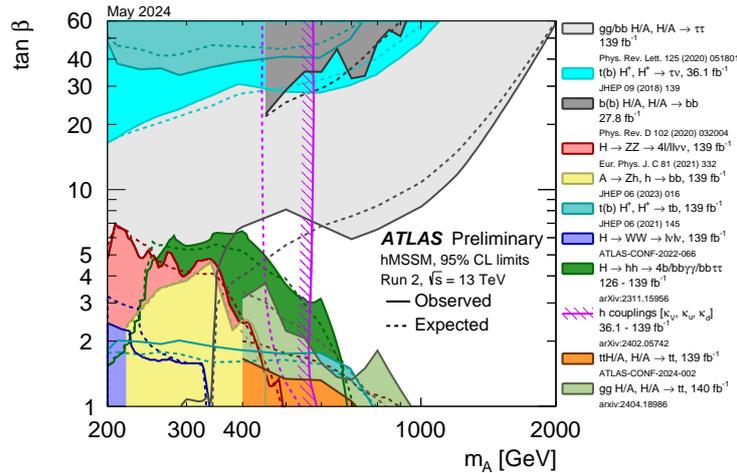


図 8: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、hMSSM シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された  $125 \text{ GeV}/c^2$  のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

もりができており、Run 2 期間（2015–2018）と比べてデータサイズが増加する様子は見えていない。

この手法を用いて、FE リンクと S リンクそれぞれのデータ転送量を見積もり、許容できる同時陽子陽子衝突数の上限を見積もったのが図 10 である。FE リンクの場合、RX redundancy 機能<sup>3</sup>を有効にしたモジュールでは、同時衝突数 38 程度からデータ転送量の上限を超えるものが現れ始める。これは、RX redundancy 機能を使用したモジュールの場合、通常の FE リンクに比べて約 2 倍のデータを 1 本の FE リンクで転送しなければならないためである。現在、Run 3 運転での最大の同時衝突数は 60 程度をターゲットに設定されているため、これらのリンクは通常の物理データ収集ランにおいてもデータ転送量の超過を起こすのであるが、FE リンクでの転送量超過の場合には、モジュール上のバッファが溢れた分のデータの代わりにエラーフラグが送信されてわずかのデータを失うだけで、DAQ そのものには支障をきたさない。一方で S リンクの場合はデータ転送量の上限を超過すると ATLAS 検出器全体のデータ収集を止めるビジー信号を発生するため、影響はより大きくなる。図 10 によると、S リンクの方は同時衝突数 77 程度まで許容することができ、これは現在の運転における最大値 60 に比べて十分に高い。ただし、LHC 運転上のターゲットと設定された同時衝突数に対して、実際の同時衝突数はある程度ふらつくため、そのふらつきの範囲で同時衝突数が 77 を超えることもある。したがって図 10 で示した結果は十分な余裕を意味しているわけではなく、今後のデータ収集においてもデータ転送量をモニタしておくことが重要となる。

これまで 10 年以上にわたって運転されてきた ATLAS 検出器は、ハドロンコライダーにおける実験環境において放射線損傷を受けてきた検出器システムとして、それそのものが興味深い研究対象でもある。これらのシステムから得られる知見は、今後高輝度 LHC やその先の将来実験における検出器を設計する際に有用である。SCT に関しては、2023 年終わりの時点で最大約  $7 \times 10^{13} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の放射線損傷を受けている。これは、たとえば高輝度 LHC 用シリコン検出器のストリップ部で予想される最大放射線量の約 10 分の 1 であるが、その損傷は LHC で実際に生成される粒子の種類（主に陽子、中性子や  $\pi$  中間子）やエネルギー

<sup>3</sup>SCT モジュールからのデータは 2 本の FE リンクに分けて転送されるが、そのうち一方が使えなくなったとき、すべてのデータをもう一方の FE リンクから転送する機能が備えられている。

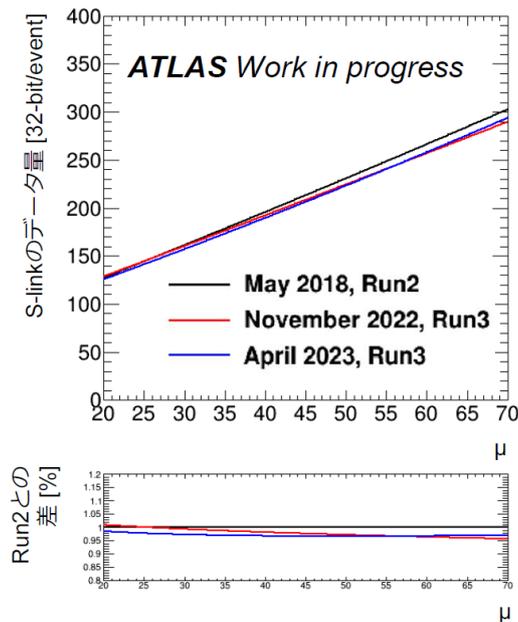


図 9: S リンクのデータ転送量（縦軸）の、同時陽子陽子衝突数（横軸）の関数としての比較結果。S リンクは全 128 本あるが、ここではその平均を示している。

スペクトルにもとづいており、特定のエネルギーの粒子ビームや原子炉中性子などを用いた照射実験よりもリアルな環境での放射線損傷となっている。Run 2 運転終了後にも、陽子陽子衝突データを利用して徹底した SCT の性能評価を行ったが (ATLAS Collaboration, JINST 17 (2022) P01013)、Run 3 データを用いた継続的な性能評価のほか、これまでに SCT では測定できていない収集電荷量分布の測定や、その他より詳細な SCT の性能解析も開始している。

### [3] 高輝度 LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発

2029 年より、LHC は瞬間ルミノシティを  $7.5 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$  に引き上げた高輝度運転に入る。劇的に増加するデータ量および放射線量に対応するため、現行 ATLAS 検出器に対する大幅なアップグレードが予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、新しいシリコン飛跡検出器である Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。バレル部は全 9 層からなり、内層 5 層はピクセルサイズ  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  (最内層のみ  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ ) のピクセルセンサー、外層 4 層は約  $75 \mu\text{m}$  ピッチのストリップを持つストリップセンサーで構成される。ITk は合計  $180 \text{ m}^2$  もの体積をもつ世界最大級のシリコン飛跡検出器であり、2028 年の完成を目指していよいよシリコンセンサー量産、および実機シリコンモジュールの量産を開始するフェーズに入った。筑波大学グループは、主にシリコンストリップおよびシリコンピクセルセンサーの量産時性能評価、およびピクセルモジュールの量産を、国内外の大学および研究機関と協力しながら進めている。

#### (1) シリコンストリップセンサー量産

2025 年までに、合計 20,100 枚の ITk 用シリコンストリップセンサーを量産する。この中で、日本グループは全体の約 3 割に相当する 6,350 枚のセンサーの量産時品質検査を担当し、

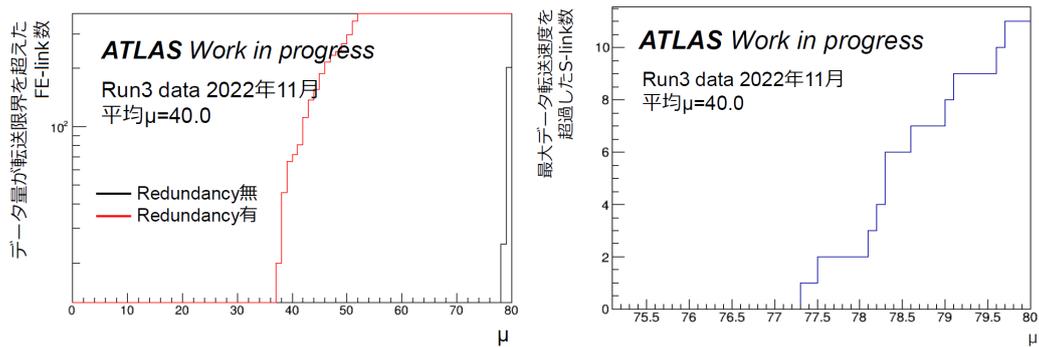


図 10: 横軸で示された同時陽子陽子衝突数において、データ転送量が上限を超えるリンク数の変化。左図はFEリンク（全 8196 本）、右図はSリンク（全 128 本）を示す。

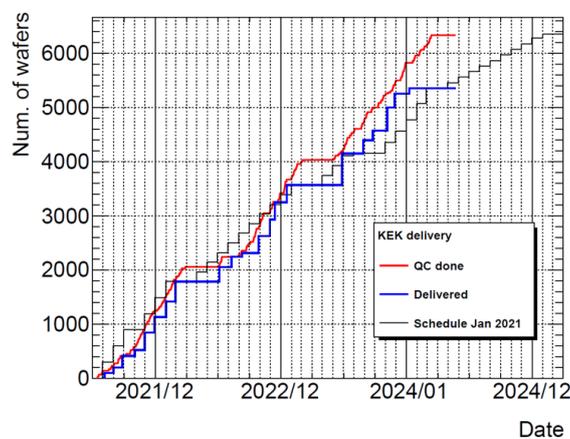


図 11: シリコンストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数（赤実線）および納入枚数（青実線）の推移（日本担当分）。青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す。

筑波大学グループは高エネルギー加速器研究機構と共同で

- シリコンセンサー全数に対する品質保証測定（形状測定およびストリップ特性測定）
- 性能テスト専用小型シリコンセンサー構造を用いた放射線耐性試験

を行ってきた。ストリップセンサーの量産は2021年7月に開始され、2023年度までに5,352枚の生産を完了した（図11）。2022年初頭からストリップ間の分離が悪く、電氣的に導通してしまっているセンサーが頻繁に見つかるようになった。これらは深紫外線やイオンガンを短時間照射することで、再び良好なストリップ間分離を得られるということがわかったものの、この回復作業のために各品質検査サイトにおける作業負荷が増大し、大きな問題となっていた。2023年に入り、製造メーカーが出荷前の手順を見直し、できる限りセンサーに対する静電気の蓄積を防ぐ手順を取り入れたことで改善でき、2023年度後半からの納入品については、同様の問題が大幅に減少した。

ストリップセンサーに対する量産性能評価として、センサーが変形していないか、また傷などがついていないかを調べるための形状測定および写真撮影（製造メーカーのクリーンルームに自動測定装置を設置）、および東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの70 MeV陽子線を用いた品質検査用テスト構造への陽子照射試験（約40枚に1枚

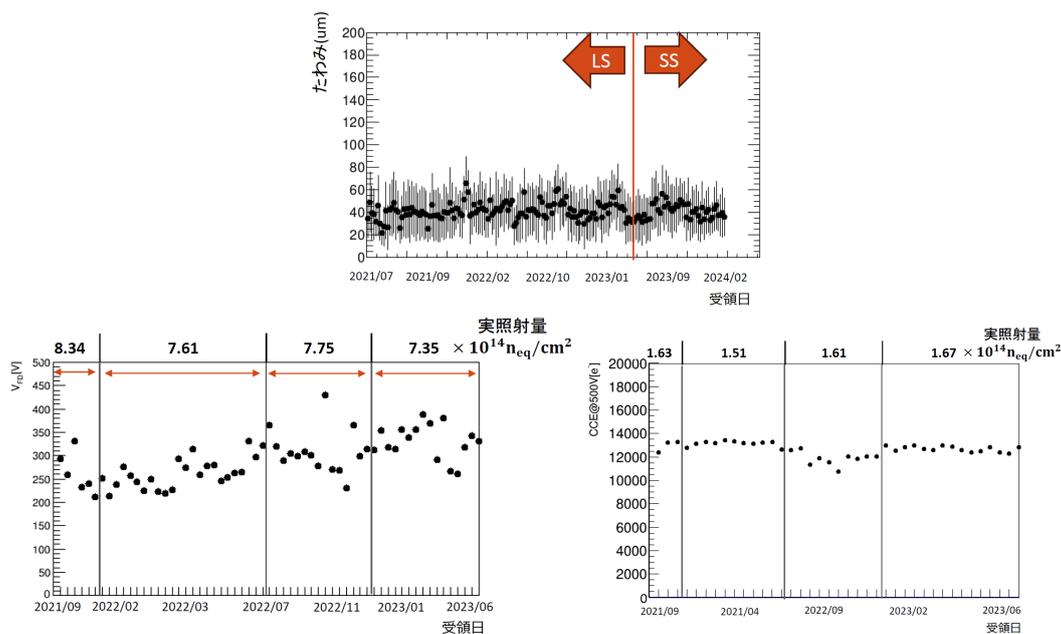


図 12: ストリップセンサー量産開始直後からの、(上) たわみ測定結果、(左) 完全空乏化電圧測定結果、(右) 電荷収集効率の測定結果それぞれの時間変化。たわみは、センサー表面  $10 \times 10$  点の高さを  $1 \mu\text{m}$  程度の精度で測定し、その最高点と最低点の高さの差として定義する。完全空乏化電圧は、静電容量-印加電圧特性を測定し、静電容量が最小となった印加電圧から測定する。電荷収集効率は  $^{90}\text{Sr}$  からのベータ線を入射させ、ストリップセンサー直下に置いたトリガーカウンターが応答したときにストリップセンサーで検出された電荷量から測定する。

の抜き取り検査、照射試験は半年に一回程度実施)を行う。これらの測定をストリップセンサー量産開始時から行ってきており、これまでに 5,352 枚分 (陽子照射試験に関しては 141 枚) の特性試験を行った。図 12 に代表例を示すように、特性はいずれの項目に非常に安定している。図 12 左下および右下に示すように、完全空乏化電圧は微増し、電荷収集効率は微減傾向にあり、いずれも特性が悪くなる方向への変化であるが、その変化量は 10% 以下程度で高輝度 LHC 実験での運用には問題とならない。

通常、照射試験の際には高輝度 LHC 全期間で期待される線量の 1.5 倍 (安全係数) に相当する  $1.6 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  をターゲットとするが、高輝度 LHC が始まってすぐにこの線量が ITk ストリップセンサーに照射されるわけではない。したがってより線量が低く、放射線損傷がまだひどくないときのセンサーの挙動も重要な情報である。そこで、2023 年 6 月の照射試験では合計 5 点の照射点を設け、センサー特性の照射量依存性も測定した。結果を図 13 に示したが、漏れ電流は照射量に対してきれいに比例しており、期待通りの結果を得た。一方で、ストリップ間特性の調査ための専用テスト構造で測定したストリップ間抵抗を見ると、約  $8 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  までは減少傾向、その後は微増傾向という特徴的な結果が見られた。これは実物のストリップセンサーでは見られていない傾向である (M. Mikestikova et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 983 (2020) 164456)。今後、実物のストリップセンサーと同様の構造を持った  $1 \text{ cm}^2$  角のミニセンサーを用い、テスト専用構造を用いて測定したストリップ間抵抗の妥当性を検証する予定である。

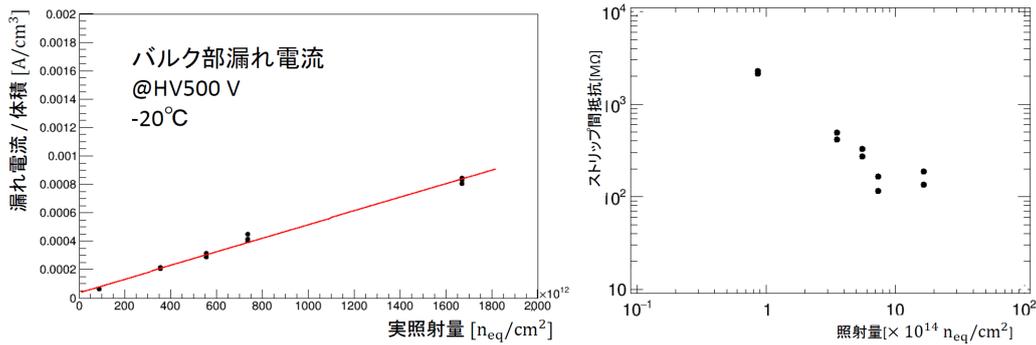


図 13: (左) 漏れ電流、および (右) ストリップ間抵抗の照射量依存性測定結果。いずれも、実物のストリップセンサーではなくテスト専用構造体への照射実験によって得られた結果である。

## (2) シリコンピクセルセンサー量産および試作モジュール性能評価

ITk 用シリコンピクセル検出器のモジュールをつくるには、まず  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  のピクセルセンサーに、2 cm 角の信号処理用 ASIC (ITkpix) 4 枚をバンプボンディングにより貼り合わせる (フリップチップ)。この時点では、信号の読み出しや電源供給を行うためのフレキシブル基板が未装着のため、“ベアモジュール”と呼ばれる。ベアモジュールのセンサー側にフレキシブル基板を接着し、ワイヤーボンディングによりフレキシブル基板と ASIC、センサーを電氣的に接続する。この状態で、モジュール表面にパリレン処理を施すことで、高電圧印加時の放電を防ぐとともに、熱変形によるバンプ接合部の剥がれを抑制する。さらにバレル部用のモジュールに対しては、フレキシブル基板上にワイヤー保護用の CFRP 製部品を、また ASIC 側には冷却パイプと接続するための冷却セルを取りつけて完成となる。日本では筑波大学の他 KEK など 8 大学・研究機関が参加し、ピクセルセンサーの性能評価からモジュール製造までを一貫して行う。ITk ピクセル用モジュールは世界各地の製作サイトで約 10,000 台が製作されるが、日本グループはそのうち 2,800 台を担当する、重要な製作サイトである。2023 年度には、モジュールの各構成部品の試験量産あるいは本量産が本格的に始まり、それに合わせて各部品や組み立て後モジュールの品質検査手順の確立が急務であった。

以下では、日本グループによる ITk ピクセル検出器製作の中で、特に筑波大学グループが 2023 年度に行った開発や解析結果について述べる。

### フレキシブル基板の品質検査

フレキシブル基板の製作については、2023 年度に試験量産を完了、その結果をもとに内部レビューに合格し、本量産が開始された。本量産では、1 日当たり 10 枚程度のフレキシブル基板に対し、センサー用高電圧 (HV) および ASIC 駆動用電圧 (LV) を印加し、その時に計測される抵抗値や漏れ電流、それらの安定性を測定する。そのための試験システムを試験量産の中で開発したのであるが、図 14 (左) に示すように、電流が不安定となる個体が一定数存在することがわかった。これらを再測定すると、ほぼ全数が次の測定では安定した電流値を示したため、これらは基板そのもの問題ではなく、基板を試験システムに設置した際の接続不良と推定される。量産時には、このような問題をその場で即座に判定できないと、正しい測定結果を得られないまま次の工程に進んだり、問題の理解に手間取ったりして

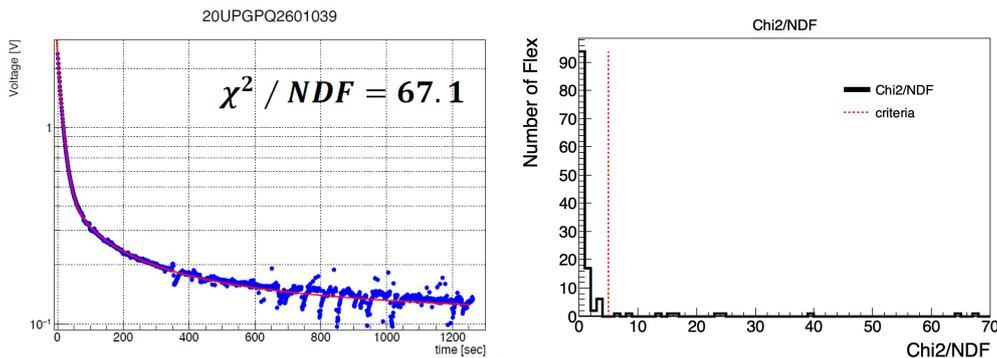


図 14: フレキシブル基板に対する高電圧印加試験の測定結果。(左) 電流安定性測定結果の一例。この例では、電流がふらついてしまっている。赤線は、青点で示されたデータ点に対し、滑らかな関数をフィットした結果である。(右) 試験量産品全数の  $\chi^2/N_{\text{NDF}}$  分布。 $\chi^2/N_{\text{NDF}} = 5$  (赤点線) を越えた個体に対して再測定を行うこととした。

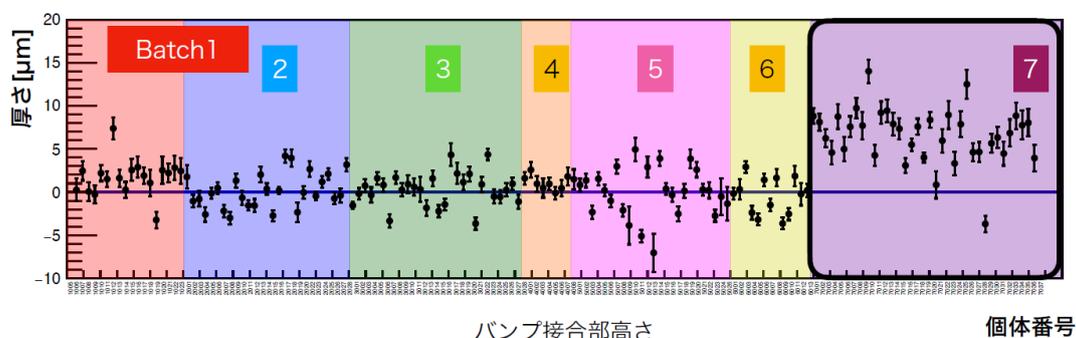


図 15: バンプ高さ測定結果。背景色の違いは製造時期に対応する。ベアモジュールの試験量産は、全部で7バッチにわけて行われた。誤差棒は、ベアモジュール上の各測定点で測定された高さ平均値に対する標準偏差に対応する。

量産に支障をきたしてしまう。そこで、

$$V(t) = V_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + Ct^{-n} + V_0 \quad (1)$$

という形式で表される滑らかな関数をフィットし、その時に得られる  $\chi^2/N_{\text{NDF}}$  値から自動で問題のある基板を自動判定するシステムを開発した。図 14 (左) の例では  $\chi^2/N_{\text{NDF}}$  が 67.1 となり、図 14 (右) に示した  $\chi^2/N_{\text{NDF}}$  分布の中でも大きく外れていることがわかる。量産時には、 $\chi^2/N_{\text{NDF}}$  が 5 を超えるような測定結果が出た場合、該当する基板について再測定をしたうえで合否判定をすることとした。また、良好な測定結果が得られたら、それを ITk グループ共通のデータベースにアップロードし、そこで一元管理できるように整備した。

#### ベアモジュールの品質検査

ベアモジュールの厚みは、モジュールを正しくローカルサポート (CFRP 製の支持構造体) に搭載するために必要な指標となる。さらに、バンプ接合の品質の安定性も反映するため、すべてのベアモジュールに対して厚み測定を行う。このとき、位置を変えながらベアモジュールの表裏両面を測定することで、ベアモジュール単体だけでなく、センサーおよび ASIC 単体の厚みを測定できる。さらに、ベアモジュール単体の厚み (325  $\mu\text{m}$ ) からセンサー厚み (150  $\mu\text{m}$ ) + ASIC 厚み (150  $\mu\text{m}$ ) を引くことで、バンプ高さを見積もることが

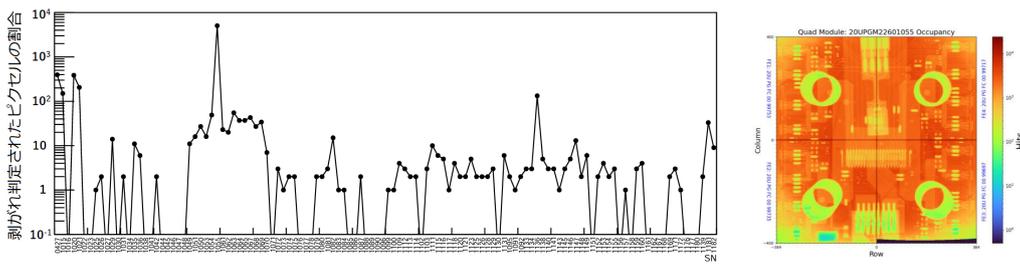


図 16: (左) 試験量産品全数に対するバンプ接合部剥がれピクセル数の測定結果。(右) 剥がれピクセル数が基準を超えたモジュールに対する X 線照射試験結果。

できる。このように、ペアモジュール品質検査では様々な形状を測定するのであるが、その一例として図 15 にはバンプ接合部の高さを見積もった結果を示した。「バッチ 7」より高さが上がっているが、これは「バッチ 1」で見られた電流-電圧特性の不良に対応するため、バンプ接合部の高さをわずかに増加させたことを反映している。このように、わずか  $5 \mu\text{m}$  程度の形状の変化をきちんと検出できる手法を完成させた。一方で、図 15 中では測定値が誤差棒以上にふらついていたり、負のバンプ高さを見積もっていたりすることがある。これは高さ測定中にまれにミス測定をすることがあり、平均値の計算に大きく影響してしまっていることが原因とわかっている。この点は今後の要改善点である。

以上のような試験量産の結果をもとに内部レビューが行われ、その結果ペアモジュールの本量産が認められた。

#### モジュールの品質検査

モジュール製作工程では、1 工程を完了するたびに形状測定や読み出し試験を行い、その健全性を確認していくため、膨大な労力を要する。2023 年度に行った試験量産では、日本グループの各大学・研究機関が協力して、130 台のモジュールを製作し、量産手順を確認した。<sup>4</sup>それぞれの検査項目の中で調べるべき点は多数あるが、特に重要な確認項目の一つが、モジュールにバンプ接合部の剥がれがないかを確認することである。これはペアモジュール製作（フリップチップ）の品質にかかわるものであるが、ペアモジュール単体では読み出しを行えないため、モジュール化して初めて調査可能となる。バンプ接合が剥がれたピクセルは、ノイズの大きさ、クロストーク量、X 線照射による信号検出率の 3 つの測定を合わせることで特定できる。図 16 に、全試験量産モジュールに対するバンプ剥がれの測定結果を示した。試験量産した 130 台のモジュールの中では、品質基準であるバンプ剥がれピクセル数 600 以下という条件を満たさなかったモジュールが 1 台のみ存在した。このモジュールの X 線照射試験結果は図 16 (右) のようになっており、確かにモジュール右下部に信号が検出されておらず、バンプ接合が剥がれていると思われる部分が存在する。このモジュールについて詳細を確認すると、これはフリップチップ後に剥がれたものではなく、そもそもバンプ形成されておらず本来使ってはいけない ASIC を使ってしまったものであるとわかった。このことを製造元に確認し、本量産では発生しないよう品質管理について確認した。図 16 (左) に示した結果は、バンプ接合が剥がれているモジュールを我々の手法できちんと検出できるという、手法の妥当性を示すものでもあった。

#### 量産試験以外のピクセルモジュールの特性評価

量産中の試験以外にも、より詳細なモジュールの特性評価を行っている。

<sup>4</sup>詳しくは、廣瀬「高輝度 LHC-ATLAS 用シリコンピクセル検出器試験量産のまとめと本量産に向けた準備状況」(日本物理学会 2024 年春季大会)の中で報告している。

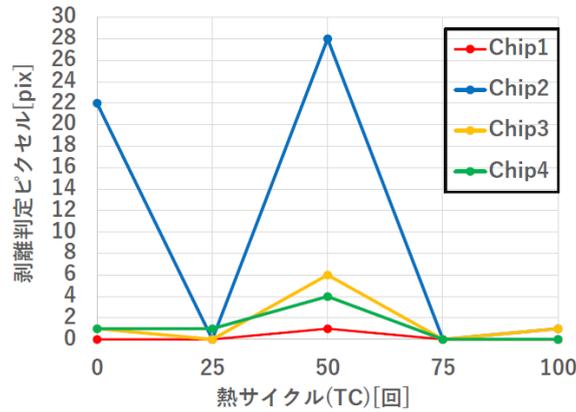


図 17: バレル部用モジュールに対する熱サイクル回数ごとのバンプ剥がれピクセル数の測定結果。1 チップのピクセル数 153,600 に対し、縦軸は十分に狭い範囲を示していることに注意せよ。チップ 2 の熱サイクル 50 回目の測定結果は一定のバンプ剥がれピクセルが存在したようにもみえるが、これらはチップ面の中でまばらに存在し、バンプ剥がれの傾向を示していないことを確認している。

バレル部用モジュール（ワイヤー保護部品と冷却セルを取り付けたもの）について、これまでに放射線照射後の特性確認を十分に行えていなかったため、 $6.3 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$  を陽子線照射した後の特性評価を行った。この照射量は、ITk ピクセル検出器のバレル部において高輝度 LHC 全期間に予想される放射線量に、安全係数をかけたものである。このモジュールに対し、高輝度 LHC ATLAS 実験の運転中にあり得る温度変化の上限である  $-55^{\circ}C$  から  $60^{\circ}C$  の温度変化を与えて熱ストレスを与える試験（熱サイクル）を 100 回繰り返した。図 17 は、25 回の熱サイクルごとにバンプ接合部が剥がれたピクセル数を計測した結果である。特にワイヤー保護部品取り付け部において、異なる材料が接合されることによる熱膨張係数の不整合から、バンプ剥がれが進行しやすくなる可能性を懸念していたのであるが、このように明らかな剥がれは見られなかった。また、漏れ電流もこれまでと同程度で問題ないことを確認し、バレル部用モジュールの構造は実験環境で十分に耐えうるものであると実証できた。

また、テストビームを 2023 年 2 月、6 月、12 月と 3 回行い、試験量産モジュールの高エネルギー荷電粒子に対する応答を詳細に調べた。2023 年 2 月のテストビームはアメリカ・Fermi 国立加速器研究所における 120 GeV 陽子ビーム、6 月と 12 月は高エネルギー加速器研究機構・PF-AR 測定器開発テストビームラインにおける約 3 GeV の電子ビームを利用したものである。一連のテストビーム実験では、現行 ATLAS ピクセル検出器に使われている FE-I4 ピクセルモジュール（ピクセルサイズ =  $50 \times 250 \mu m^2$ ）を 4 層重ねたテレスコープで飛跡再構成を行い、その飛跡を使って位置分解能や検出効率を測定した。図 18 は測定結果の一例である。ITk ピクセルモジュールに使われているセンサーは、フリップチップの際に ASIC 同士の最低限の間隔を確保するため、ASIC 境界にあたる部分はピクセルサイズが通常の 2 倍である  $100 \mu m$  幅に拡大されている。ピクセルモジュール全体に対して占める面積はわずかではあるのであるが、この境界領域でもしっかり位置分解能と検出効率を測定でき、それぞれ通常のピクセルサイズと比べてわずかに劣るものの、高輝度 LHC-ATLAS 実験における飛跡再構成性能に影響しない性能が出ていることを確認できた。

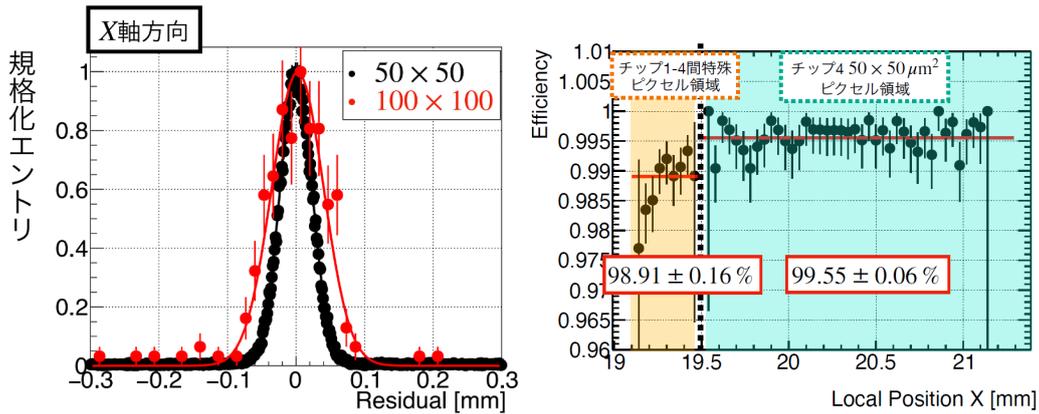


図 18: テストビームによって得られた、試験量産モジュールの（左）飛跡との残差分布、および（右）検出効率の測定結果。

#### 【4】 将来素粒子実験のための半導体検出器開発

高輝度 LHC ATLAS 実験のための ITk は、既に設計が固まり量産のフェーズに移行したのであるが、2034 年ごろにはピクセル部の最内層 2 層の過剰な放射線損傷により十分な性能が出なくなると予見されており、その直後の長期シャットダウンでの入れ替えを予定している。さらに将来のヒッグスファクトリー実験やより高エネルギーなハドロンコライダー実験に向けては、超高精細・超耐放射線・優れた時間分解能をもつ究極の飛跡検出器の開発が必須である。筑波大学グループでは、将来実験に向けた基礎的な半導体検出器研究開発も開始している。

##### (1) モノリシック CMOS センサー MALTA2 の性能評価

MALTA2 は、CERN が中心となって開発中のシリコン検出器で、センサーと回路を CMOS 技術で一体成型したモノリシックセンサーである。ITk ピクセルセンサーよりも小さい  $36 \mu\text{m}$  角のピクセルサイズを持ち、バンプ接合によるピクセルサイズの制約がないため、原理的にはより小さいピクセルサイズも実現可能である。将来ハドロンコライダーでの使用を見据えた高放射線耐性が特徴で、これまで  $2 \times 10^{15} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の放射線照射をした後も十分な検出効率を保持していることがわかっている。2023 年に行った 3 回のテストビームでは、MALTA2 サンプルもセットアップに組み込み、その特性評価を行うとともに、MALTA2 を飛跡再構成に利用することでテレスコープの飛跡再構成性能の向上を狙った。

図 19 は、アメリカ・Fermi 国立加速器研究所で行ったテストビームで得られた結果である。位置分解能は、テレスコープの飛跡位置分解能を含めて  $9.8 \mu\text{m}$  と非常に良好な結果を得た反面、検出効率は一律に 91% と、シリコン検出器として通常期待される検出効率（通常 99% 以上）よりも有意に低い結果となった。モノリシック CMOS センサーはピクセル構造が複雑であり、低い検出効率はそのピクセル構造が原因である可能性がある。今後は、MALTA2 開発チームと議論を重ねながら、この結果に対する理解を進める予定である。

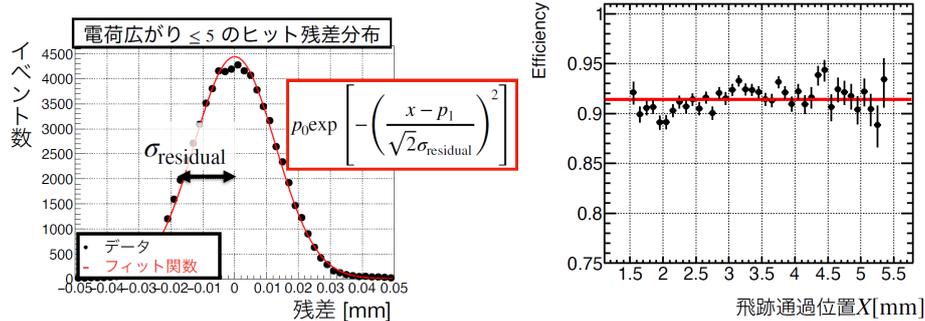


図 19: テストビームによって得られた、MALTA2 検出器の (左) 飛跡との残差分布、および (右) 検出効率の測定結果。

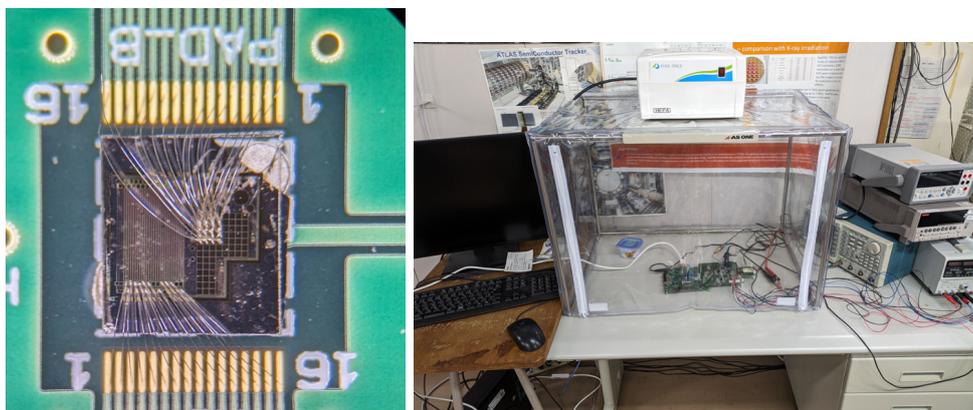


図 20: (左) GaN ピクセル・ストリップ検出器。(右) 実験室に構築した測定用セットアップ。

## (2) 窒化ガリウム検出器の研究開発

窒化ガリウム (GaN) は、シリコンよりも大きい 3.4 eV のバンドギャップエネルギーを持ち、より優れた放射線耐性を持つと期待される。実際には、バンドギャップエネルギーが高いことから正孔電子対を生成するためのエネルギーも高く、また不純物濃度の抑制が難しいことから、現在のところ単体の荷電粒子を検出するのに十分な電荷量を得ることは難しい。技術的な困難はあるものの、一方で GaN は優れた特性を持つパワー半導体素材として近年産業利用が急速に拡大しており、本研究室では、物理工学域・奥村研究室などと共同で、2023 年度から GaN 検出器の研究開発を開始した。図 20 に示すように GaN ピクセル・ストリップ検出器ができており、これらに  $^{137}\text{Am}$  からのアルファ線を照射して、その時の信号波高やクロストークなど基本的な特性を測定することが、まず第一の目標である。まだ主だった測定結果は出ていないが、2024 年度から本格的な特性測定を行っていく予定である。

## (3) LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの  $n^{++}$  電極の直下に高濃度の  $p^+$  層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能も飛躍的に向上する。LGAD では荷電粒子に対して 30 ps 程度の時間分解能が達成できる。高輝度 LHC (HL-LHC) やさらに高輝

度の加速器実験（FCC 等）では、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成が要求されるので、時間情報に加え半導体検出器の優れた位置分解能を実現できれば、有効な検出器となると期待できる。

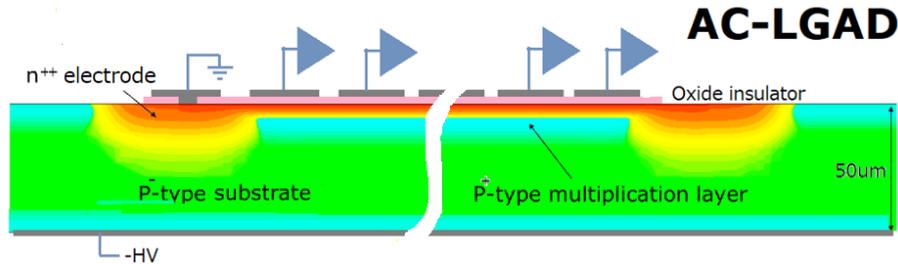


図 21: AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

LGAD を飛跡検出器とするためには電極の細分化が必要である。そのために、増幅層と読み出し電極を酸化膜を介した AC 結合にする AC-LGAD の設計・試作を 2019 年度から開始した。図 21 に AC-LGAD の概念図を示す。これまでに、 $100\ \mu\text{m}$  ピッチのピクセル型検出器を作成し、チャンネル間のクロストークも十分に抑制することに成功している。また、時間分解能も  $30\ \text{ps}$  程度を達成している。

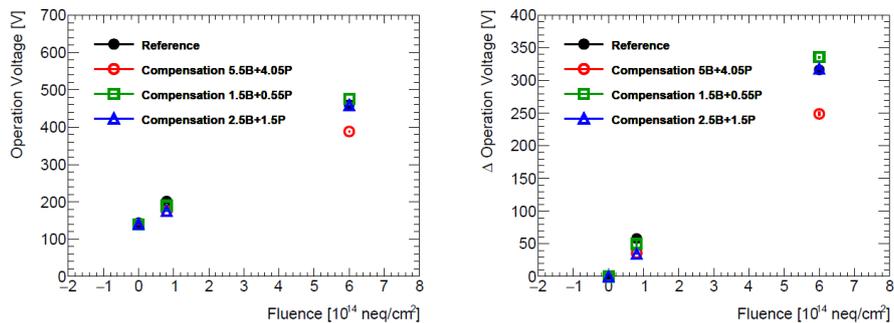


図 22: 補償法による放射線耐性向上の試み。(左) 運転電圧および (右) その上昇幅の照射量依存性。異なるシンボルは濃度の違いを表す。赤丸はホウ素濃度が通常の 5 倍、リン濃度が 4.05 倍。

将来の加速器実験で用いるには、検出器の放射線耐性が不可欠である。放射線損傷により、LGAD の増幅層である  $p^+$  不純物の密度が減少し、その結果、所定の信号増幅度を得るために必要なバイアス電圧が照射量とともに上昇し、いずれ耐圧  $600\ \text{V}$  を越えてしまう問題がある。目標は、 $10^{16}\ \text{neq/cm}^2$  程度の照射量まで作動することである。

海外の研究では、照射によりホウ素が格子から外れ非活性化することと、それらがウェハ内の酸素と結合してドナー準位を形成することを要因とした。実際に炭素を注入し酸素と結合させることで、放射線耐性の改善に成功している。実用にはさらなる耐性向上が必要である。浜松ホトニクスと協力し (1) 補償法 (増幅層の  $p$  型および  $n$  型の不純物濃度を通常の数倍程度に高め、損傷後にも十分な濃度を確保しようとする方法)、(2) 部分活性ホウ素法 (最初に多めに注入したホウ素の一部を、熱処理を調整することであえて非活性化させておく。これらは酸素と結合するので照射により酸化ホウ素 BO が増加することを防ぐ)。2つの方法による試料を東北大学 CYRIC で  $3 \times 10^{15}\ \text{neq/cm}^2$  までの陽子線照射をした。(1) は、

$6 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射に対し、バイアス電圧の上昇を約 325 V から約 250 V へと抑制することができた (図 22) が、 $3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射後には、600 V 以下の電圧では信号と雑音の分離ができなかった。また、未照射の状態でも、不純物濃度の上昇により増幅度 (波高) が減少し、時間分解能が悪化している。(2) は、バイアス電圧上昇の軽減について大きな改善は見られなかった。今後は、炭素注入などの改善法を研究する。

放射線耐性以外の観点では、時間分解能および位置分解能を決定する要因を探るため、レーザー光照射により、時間分解能に対するノイズやジッターの寄与、また、位置分解能と電極サイズの関係など、基本性能の測定を行い理解を深めた。さらには、飛跡検出器に向けて、多チャンネル化のための読み出しエレクトロニクスの開発および試験を行っている。

本研究は、科研費および日米技術協力の枠組み (代表：高エネルギー加速器研究機構中村浩二助教、宇宙史研究センター連携教員) で、米国のフェルミ研究所、LBL 研究所、UCSC 大学と連携しながら開発研究を推進してきた。

## [5] COBAND 実験

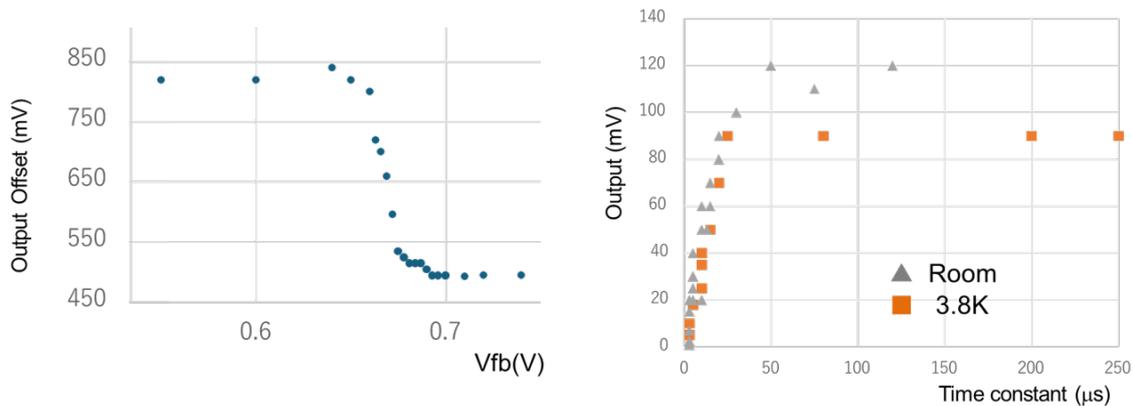


図 23: 入力に ESD 保護回路を持つ SOI 電荷積分回路の室温と極低温 (3.8K) における測定結果。(左) 極低温での出力信号のベースラインレベルの  $V_{\text{fb}}$  依存性。(右)  $V_{\text{fb}}$  を変化させた時の出力信号の波高と出力信号時定数の関係 (20 fC のテストパルス入力)。

COBAND は、筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同プロジェクトであり、現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値  $10^{12}$  年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を探索する実験を計画中である。我々のグループでは、観測ロケット実験で使用予定のニオブ (超伝導ギャップエネルギー  $\Delta = 1.55 \text{ meV}$ ,  $T_c = 9.23 \text{ K}$ ) を超伝導体、アルミニウム ( $\Delta = 0.172 \text{ meV}$ ,  $T_c = 1.20 \text{ K}$ ) を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム ( $\Delta = 20 \text{ } \mu\text{eV}$ ,  $T_c = 0.165 \text{ K}$ ) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

現在、産総研 CRAVITY (現 Qufab) との共同研究によって、漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発が行われ、要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した Nb/Al-STJ 素子が製作されている。しかしながら、冷凍機内の極低温ステージ上の STJ からの信号の読出しは (a) 長い冷凍機配線を経た先に接続された Nb/Al-STJ 素子を動作させるために 0.4 mV 程度とい

う微小で正確な定バイアス電圧が必要, (b) 検出目標となるニュートリノ崩壊光の単一光子 ( $E_\gamma \sim 25$  meV) に対する期待される出力電荷は, 約  $250 e(0.04$  fC) と極めて微弱, (c) STJ からの信号の時定数は数  $\mu$  秒と比較的速く, 対して STJ 自身の静電容量は, 数十 pF $\sim$ 数 nF と大きい, という理由により, 単純ではなく, むしろ究極のチャレンジと言える。そこで, 我々のグループでは STJ 素子のすぐ近くで信号を増幅可能な読出系として FD-SOI(Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究のもとで行っている。これまでの研究成果として, FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いたソース接地増幅回路の比較的簡単な増幅器の試作を始め, 極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号を同じ極低温ステージ上での増幅読出や, 容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現された低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器を試作し, 極低温での動作及び STJ 信号の電荷読出し試験等の実績がある。これらによって得られた知見のもと, 可視光 $\sim$ 近赤外域までの単一光子を十分に検出可能な性能をもつ増幅回路を設計し, SOI ウェハ相乗り製造プロセスに参加して製作した。

2023 年度の活動として, 近年製造された電荷積分型増幅器の極低温試験を行った。この増幅器は, カスコード接続による差動増幅段にキャパシタンスと可変抵抗が並列接続された負帰還回路を持っており, 積分の CR 時定数を可変抵抗の値で調整できるようになっている。可変抵抗としては, MOSFET を用いており, ドレイン-ソース間抵抗をゲート電圧  $V_{fb}$  によって制御可能としている。これらの回路では, 回路内の MOSFET のゲート端子が外部に接続する箇所全てに ESD 保護回路を搭載させ, 静電気による故障の可能性が低減することを期待した。ただし, 負帰還抵抗として用いている MOSFET の  $V_{fb}$  の値によっては, 負帰還電流が入力端子に付加された ESD 保護回路のリーク電流と比較して無視できない程小さくなり, その場合は入力端子が仮想接地されなくなるため, 出力信号のベースラインを大きくシフトしてしまうことが判明した。図 23 (左) は, 増幅器の出力信号のベースライン電圧を負帰還抵抗 MOSFET の  $V_{fb}$  の関数として極低温 (3.8 K) で実測結果を示している。MOSFET の閾値付近 ( $V_{fb} \sim 0.66$  V) で急激に出力信号のベースライン電圧がシフトして 825 mV 付近で飽和している。ベースライン電圧が飽和状態では増幅器は正しい動作はしないため, 飽和しない領域で使用する必要がある, これによって負帰還抵抗の値, すなわち積分の CR 時定数が制限されてしまうという問題があることが判明した。そこで, 20 fC のテストパルス入力に対する出力信号の波高を積分時定数の関数として実測 (図 23 右) したところ, 十分な積分時定数として,  $\sim 100$   $\mu$ s が確保できていることが確認できた。また, 増幅器の入力電荷に対する電圧利得は, 極低温でも 4.5 mV/fC が得られており, 波長 465 nm の可視光単一光子に対する Nb/Al-STJ の応答電荷 ( $\sim 3$  fC) が十分検出可能な性能を持っていることが確認された。

また, Hf-STJ の開発においては, 韓国 IBS のグループとの共同研究によって X 線に対する応答を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて測定し, Hf-STJ として世界で初めて  $^{55}Fe$  からの X 線域単一光子に対する応答信号を分解能 6.7 %で確認することに成功し, また, 電流-電圧特性の温度依存性などから得られる素子の物性も得られた。この成果について, 論文執筆を進めている。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が実現すれば, アレイ状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2%以下の一光子分光が可能となる。ロケット実験に向けた望遠鏡の光学系及び Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発も福井大, 中部大, 関西学院大等との共同研究により進められている。これまでの成果として, 波動光学シミュレーションに基づいた

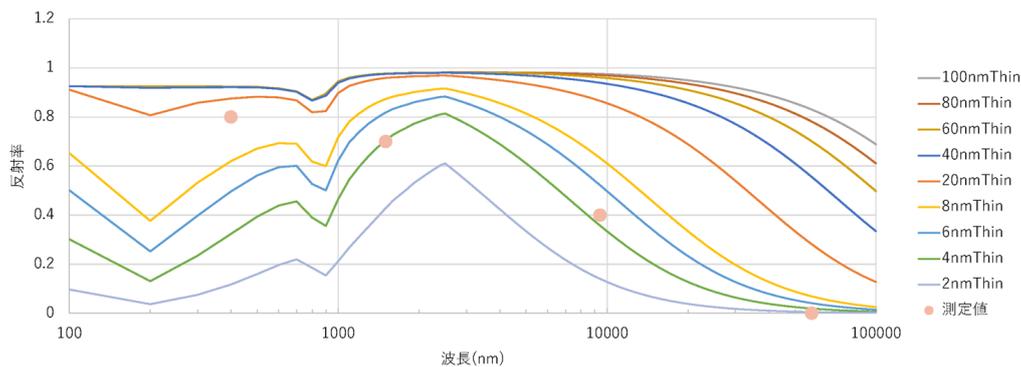


図 24: 円錐型ホーン集光器の側面での各波長での反射率測定結果 (丸点)。ホーン側面での反射率を仮定したシミュレーションから求めた反射率と集光器集光率の関係を用い、集光器集光率の実測からホーン側面反射率を推定している。曲線はホーン側面でのアルミ蒸着厚に対する反射率を波長の関数を示す。結果は、アルミ蒸着厚が 4 nm 程しかないことを示唆している。

50  $\mu\text{m}$  域回折格子設計・製作，及び福井大の遠赤外線分子レーザーによる回折格子の性能を確認している。また，光学シミュレーションによる望遠鏡光学系の設計，及びミラーの一部の試作，並びに焦点位置で回折限界 400  $\mu\text{m}\Phi$  の広がりを持つ像を 40  $\mu\text{m}$  角 STJ 表面に集めるための集光器，STJ 素子表面に施す反射防止膜の開発を行っている。

2023 年度における成果としては，前年度に引き続き，反射防止膜最適化のため Nb の極低温・遠赤外域での光学定数測定 ( $n, k$ ) を目指し，予備測定として，室温・遠赤外光 (波長 47  $\mu\text{m}$ ，118  $\mu\text{m}$ ) での光学定数測定を自作の装置でのエリプソメトリ法により行った。また，レーザーアブレーションによる微細加工技術を用いて，2 mm 厚石英基板に，入射口 400  $\mu\text{s}$ ，射出口 60  $\mu\text{s}$  の円錐ホーン形状の集光ホーンを作製し，側面に 100 nm 厚のアルミ蒸着を行った。この集光器の集光率を可視～遠赤外域レーザーを用いて測定した。可視～近赤外域は筑波大で行い，また中赤外～遠赤外域は中部大の共同研究者により製作された遠赤外分子レーザーを用いて，中部大で行った。この結果，アルミ 100 nm 厚では遠赤外光はほぼ透過してしまうことが判明した。また，可視～中赤外域でも円錐ホーン側面ではアルミ蒸着の厚みが十分ではなく，側面での透過があることが示唆された。そこで，円錐ホーン側面での反射率を仮定したシミュレーションを行い，集光器での集光率と反射率の関係を求め，集光率の実測値から，可視～中赤外域の波長でのホーン側面反射率を求めた (図 24)。これにより，465 nm の点を除けば，ホーン側面のアルミ蒸着厚が 4 nm 程しかないという結果が得られた。今後は，違う波長の測定点を増やすことによって検証を重ね，測定データの確度を高めるのと同時に，十分なホーン側面反射率を確保するため，アルミ蒸着厚を 100 nm 以上にすることを計画している。

## 【6】 PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の観測は，ニュートリノのマヨラナ性や，物質の起源解明に関わる重要な研究である。もし発見されれば現在の宇宙が反物質でなく，物質で形成されている事実を理論的に説明することが出来る。また， $0\nu\beta\beta$  崩壊率はニュートリノ有効質量二乗に比例するため，その半減期を測定すれば，素粒子標準理論の粒子で唯一未決定のニュートリノ質量も測定可能である。ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ( $2\nu\beta\beta$ ) が究極のバックグラウンド (BG) となるが，それを防ぐためにはエネルギー

分解能を高める必要がある。また、極稀な  $0\nu\beta\beta$  を測定するためには、大量の標的核を必要とする。半導体を用いた実験なども存在するが、シンチレータを用いたシンプルな実験は大型化の際に有利である。二重ベータ崩壊は  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{160}\text{Gd}$  等、十数種類の特定の原子核のみで観測可能である。我々は、 $\text{Ce}:\text{Gd}_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}$ （以下、GAGG）という無機シンチレータを用いて、 $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索実験（PIKACHU 実験）を計画している。 $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索では、2001 年にウクライナで GSO シンチレータを用いて行われた実験がこれまでの最高感度である。二重ベータ崩壊実験では大量の標的核を用いることが重要であるが、この実験で用いられた GSO に含まれる  $^{160}\text{Gd}$  の量は 100g と少ないことで感度が制限されている。さらに内部の放射性不純物によるアルファ線がバックグラウンドとして多く存在し、それによって感度が制限されている。我々はこの二点を解決して、最高感度での  $^{160}\text{Gd}$  二重ベータ崩壊探索を目指している。

### (1) 高純度 GAGG 結晶のバックグラウンド評価

我々は、ウラン・トリウム（U/Th）系列の放射性不純物を極力含まない、高純度な GAGG 結晶の開発に取り組んでおり、2023 年初頭にその第一段となる結晶が完成した（図 25 左）。これは結晶原料のうち  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に対して、高純度なものを検討した結果である。2023 年度は、この結晶内の放射性不純物量の詳細な見積もりを行った。これまでは筑波大学に設置した鉛シールドでデータ取得を行っていたが、環境放射線や宇宙線起因の事象などが多く、結晶内起源の放射性不純物量を精度良く測定できていなかった。我々は、2023 年 6 月に岐阜県神岡の東北大学茂住実験室においてバックグラウンド評価のための実験を行った。茂住実験室は地下 1000m にあるため、宇宙線の影響が地上の 10 万分の 1 に低減される。また、環境放射線を低減するための放射線シールド（鉛 15 cm 厚、銅 5 cm 厚）が設置されており、図 25 右に示すように、その内部に結晶とライトガイド、光電子増倍管からなる検出器モジュールを設置してデータ取得を行った。

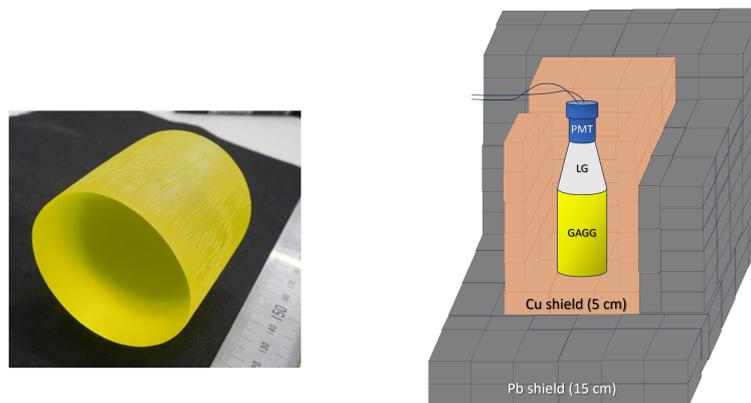


図 25: (左) PIKACHU 実験で開発した高純度 GAGG 結晶の写真。サイズは直径 54 mm × 長さ 52 mm、重さは 784 g である。(右) バックグラウンド測定実験のセットアップ概念図。GAGG 結晶をライトガイド (LG)、光電子増倍管 (PMT) と組み合わせた検出器を作製し、銅と鉛の放射線シールド内に設置した。

実験は、6 月 12 日から 3 日間かけて行われた。まずはじめに、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$  などのガンマ線源を照射してエネルギー較正を行った。次に、光電子増倍管のゲイン調整や、データ取得回路の閾値調整が行われ、バックグラウンドデータの取得を開始した。また、光電子増倍管の種類を変えたデータなども取得し、有益な実験を行うことができた。実際に地下 1000

mの実験室で、実験を行った際の写真を図26に示す。実験期間での多くの鉛や銅ブロックの積み下ろし作業によって皆疲れ果てたことを申し添えておく。



図 26: 神岡の地下実験室内の鉛シールドを用いたバックグラウンド調査実験の様子。

得られたデータはつくばに持ち帰り、詳細なデータ解析を進めた。重要なのは結晶内部にどのようなバックグラウンドが存在するかを理解することだが、主だったものはU/Th崩壊系列の放射性同位体である。U/Thの崩壊系列は、途中の長寿命な核を親核とした要素に分けて考えることが出来る。例えば、ウラン238系列なら、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ の4つが半減期10年以上であるため、実験期間の間では放射平衡に達することは無い。そのため、この4種を別要素に分けて、アルファ線、ベータ線ごとにGEANT4でエネルギースペクトルをシミュレーションした。そして幸いにしてGAGG結晶は波形弁別(PSD)によってアルファ線とベータ線の信号を非常に精度よく分離可能である。そこで我々は、まずPSDによってアルファ線事象を抽出し、それらのデータに対してU/Th崩壊系列の要素ごとのスペクトルをフィットすることで、各要素毎に定量的に不純物量を評価することにした。その結果を図27に示す。シミュレーションのフィッティング結果は、データを非常によく再現していることが分かる。

フィッティングの結果を表1にまとめた。従来のGAGG結晶を用いた時、とりわけ大きなバックグラウンド源となっていたのは、 $^{238}\text{U}_{\text{upper}}$ と $^{232}\text{Th}$ であった。その2要素において、高純度GAGG結晶では約一桁の大幅な低減が認められた。ただし、原料の純度と比べると、結晶はより多くの不純物を含有していることも分かった。

## (2) ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊に対する感度評価

得られた高純度GAGGのバックグラウンドレベルを用いて、PIKACHU実験の現状の二重ベータ崩壊探索感度を以下の式で見積もった。

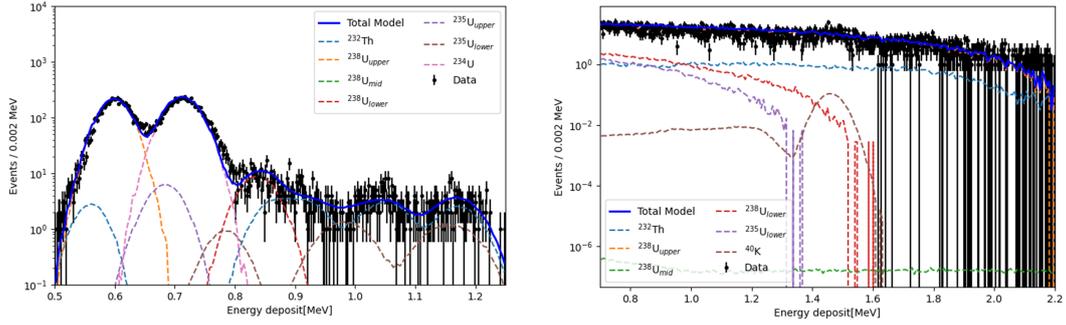


図 27: (左) 環境放射線を防ぐ鉛シールド内で丸一日程度測定したバックグラウンドデータから、PSD でアルファ線を選び出したときのエネルギースペクトルと GEANT4 シミュレーションによるフィッティング結果。(右) 同じデータから PSD でベータ線を選び出したときのエネルギースペクトルとフィッティング結果。

表 1: アルファ線のフィッティングから得られた U/Th 系列の放射性不純物量を従来 GAGG, 高純度 GAGG, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 原料 (参考値) について示す。単位は mBq/kg。

不純物種類	従来 GAGG	高純度 GAGG	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (原料)
<sup>232</sup> Th	288.8±19.6	10.3±0.8	1.66 ± 0.41
<sup>238</sup> U <sub>upper</sub>	911.3±10.1	125.2±1.6	< 16.3
<sup>238</sup> U <sub>mid</sub>	16.5±3.5	<0.28	< 0.43
<sup>238</sup> U <sub>lower</sub>	655.5±5.8	5.93±0.44	-
<sup>235</sup> U <sub>upper</sub>	<22.0	4.06±1.86	< 10.0
<sup>235</sup> U <sub>lower</sub>	73.5±15.3	3.07±0.68	< 1.19
<sup>234</sup> U	891.4±20.9	154.6±2.4	-

$$T_{1/2}^{0\nu} = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \epsilon \sqrt{\frac{M \cdot t}{BG \cdot \Delta E}} \quad (2)$$

高純度 GAGG 結晶 (直径 6.5cm、長さ 14.5cm) を 2 個用いて実験した場合、計算される感度は  $4.40 \times 10^{21}$  年である。ここで、アボガドロ数 ( $N_a$ ) は  $6.02 \times 10^{23}$  原子/mol、<sup>160</sup>Gd の自然存在量 ( $a$ ) は 0.219、<sup>160</sup>Gd ( $A$ ) の原子質量は 0.157 kg/mol、検出効率 ( $\epsilon$ ) は 1.00 と仮定した。検出器質量 ( $M$ ) は 6.40 kg、探索期間 ( $t$ ) は 1.59 年であり、ウクライナで行われた先行研究と合わせた。1.73±1.5 $\sigma$  MeV 以内のバックグラウンド ( $BG \cdot \Delta E$ ) は  $17.7 \times 10^4$  事象/kg/年である。

以上より、PIKACHU 実験の期待される探索感度は、先行研究で得られた半減期下限値 ( $2.3 \times 10^{21}$  年) を超えており、高純度 GAGG 結晶の開発が成功したことを示している。今後は開発した高純度 GAGG 結晶を大型化して、PIKACHU 本実験開始に向けた準備を進める。また、並行してさらなる高純度化に取り組んでいく予定である。

#### 〈 競争的資金 〉

1. 科学研究費 若手研究「高運動量ヒッグス粒子をプローブとした TeV ダークマターの探索」, 2023–2025 年度, 研究代表者: 廣瀬茂輝, 2,080 千円 (直接経費: 1,600 千円、間

接経費: 480 千円) (2023 年度)

2. 科学研究費 基盤研究 (B) 「高時間分解能を実現する半導体検出器を用いた飛跡検出器の開発」 2021-2023 年度, 研究代表者: 中村浩二, 分担者: 武内勇司  
500 千円 (2023 年度分担金)
3. 科学研究費 基盤研究 (B) 「実験・理論両面から迫る Gd-160 の二重ベータ崩壊」, 2023 - 2026 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 4,680 千円 (直接経費: 3,600 千円、間接経費: 1,080 千円) (2023 年度)
4. 科学研究費 挑戦的研究 (萌芽) 「波長粒子識別法を用いた革新的中性子検出器の開拓」, 2023 - 2024 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 3,640 千円 (直接経費: 2,800 千円、間接経費: 840 千円) (2023 年度)
5. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「PIKACHU 実験によるガドリニウム 160 の二重ベータ崩壊の研究」, 2022 - 2023 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 3,250 千円 (直接経費: 2,500 千円、間接経費: 750 千円) (2023 年度)
6. 公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団/コニカミノルタ画像科学奨励賞 「放射線粒子の色を見る! 革新的シンチレーション検出器の開発」, 2022 - 2024 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 500 千円 (直接経費: 500 千円、間接経費: 0 千円) (2022-2024 年度)
7. 公益財団法人旭硝子財団/物理・情報分野 研究奨励 「材料科学・機械学習との融合による新しいシンチレーション検出器と粒子識別手法の開拓」, 2022 - 2023 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 1,900 千円 (直接経費: 1,900 千円、間接経費: 0 千円) (2022-2023 年度)
8. 公益財団法人島津科学技術振興財団/研究開発助成 (領域全般) 「無機シンチレータでの発光波長と応答波形を用いた粒子識別技術の開拓」, 2021 - 2024 年度, 研究代表者: 飯田崇史, 1,000 千円 (直接経費: 1,000 千円、間接経費: 0 千円) (2021-2024 年度)
9. TIA 連携プログラム探索推進事業かけはし 「高放射線耐性半導体を用いたピクセル検出器実証に向けた調査研究」, 2023 年度, 研究代表者: 奥村宏典 (研究分担者: 廣瀬茂輝), 150 千円

#### 〈 受賞 〉

1. 飯田崇史, 「 $^{48}\text{Ca}$  の極稀崩壊研究のための検出システムの高度化」 第 4 回日本アイソトープ協会奨励賞 (2023 年)
2. 今村友香, 第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023, 優秀賞 (2023 年 5 月 18-20 日)
3. 北彩友海, 第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023, 優秀賞 (2023 年 5 月 18-20 日)
4. 鈴木尚紀, シンチレータ研究会 SMART2023, 優秀ポスター発表賞 (2023 年 8 月)

5. 今村友香, 日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子実験領域), 第 78 回年次大会 (2023 年 9 月)
6. 大森匠, 日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子実験領域), 第 78 回年次大会 (2023 年 9 月)

〈 国際会議の実施 〉

1. “Origins and Evolution of the Universe, Matter and Life”, International Symposium of the Tomonaga Center for the History of the Universe (TCHoU), at the occasion of the Semi-Centennial Anniversary of the University of Tsukuba, September 28, 2023.
2. International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science” (DBD23), Organizing Committee: Takashi Iida, December 1-3, 2023, Hilton Waikoloa, Hawaii, USA

〈 論文 〉

(査読論文)

1. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, jets and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **12**, 167 (2023)
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence of pair production of longitudinally polarised vector bosons and study of CP properties in  $ZZ \rightarrow 4\ell$  events with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” JHEP **12**, 107 (2023)
3. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral  $tqH$  interactions with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” JHEP **12**, 195 (2023)
4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for vector-boson resonances decaying into a top quark and a bottom quark using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **12**, 073 (2023)
5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  decays in 140 fb<sup>-1</sup> of  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **847**, 138315 (2023)
6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for magnetic monopoles and stable particles with high electric charges in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 112 (2023)

7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined Measurement of the Higgs Boson Mass from the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  Decay Channels with the ATLAS Detector Using  $\sqrt{s} = 7, 8,$  and 13 TeV  $pp$  Collision Data,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 251802 (2023)
8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single vector-like  $B$  quark production and decay via  $B \rightarrow bH(b\bar{b})$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 168 (2023)
9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  effective lifetime with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 199 (2023)
10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Pursuit of paired dijet resonances in the Run 2 dataset with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **108**, 112005 (2023)
11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons with flavour-violating couplings in multi-lepton plus  $b$ -jets final states in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **12**, 081 (2023)
12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new heavy scalar particle decaying into a Higgs boson and a new scalar singlet in final states with one or two light leptons and a pair of  $\tau$ -leptons with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 009 (2023)
13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fast  $b$ -tagging at the high-level trigger of the ATLAS experiment in LHC Run 3,” *JINST* **18**, P11006 (2023)
14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark photons in rare  $Z$  boson decays with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 251801 (2023)
15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Anomaly detection search for new resonances decaying into a Higgs boson and a generic new particle  $X$  in hadronic final states using  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **108**, 052009 (2023)
16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-sections of the electroweak and total production of a  $Z\gamma$  pair in association with two jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **846**, 138222 (2023)
17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of multijet event isotropies using optimal transport with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 060 (2023)

18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for leptoquarks decaying into the  $b\tau$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 001 (2023)
19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Majorana neutrinos in same-sign WW scattering events from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C **83**, 824 (2023)
20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to tau leptons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **09**, 189 (2023)
21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for periodic signals in the dielectron and diphoton invariant mass spectra using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 079 (2023)
22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of winos and higgsinos in events with two same-charge leptons or three leptons in  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 150 (2023)
23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like T quarks decaying into Ht or Zt in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **08**, 153 (2023)
24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of muons with small displacements in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **846**, 138172 (2023)
25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new pseudoscalar decaying into a pair of muons in events with a top-quark pair at  $s=13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **108**, 092007 (2023)
26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the reconstruction of large impact parameter tracks in the inner detector of ATLAS,” Eur. Phys. J. C **83**, 1081 (2023)
27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search in diphoton and dielectron final states for displaced production of Higgs or Z bosons with the ATLAS detector in  $s=13$  TeV  $pp$  collisions,” Phys. Rev. D **108**, 012012 (2023)
28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass  $W\gamma$  and  $Z\gamma$  resonances using hadronic W/Z boson decays from  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 125 (2023)

29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an axion-like particle with forward proton scattering in association with photon pairs at ATLAS,” *JHEP* **07**, 234 (2023)
30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed  $W$  gauge bosons in final states with charged leptons and jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 1164 (2023)
31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of an Excess of Dicharmonium Events in the Four-Muon Final State with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 151902 (2023)
32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial and differential cross-section measurements for the vector-boson-fusion production of the Higgs boson in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  decay channel at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **108**, 072003 (2023)
33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence of off-shell Higgs boson production from  $ZZ$  leptonic decay channels and constraints on its total width with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **846**, 138223 (2023)
34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “New techniques for jet calibration with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 761 (2023)
35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Sensitivity of Two-Particle Correlations in  $pp$  collisions to the Presence of Hard Scatterings,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 162301 (2023)
36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of four-top-quark production in the multilepton final state with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 496 (2023) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **84**, 156 (2024)]
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Inclusive and differential cross-sections for dilepton  $t\bar{t}$  production measured in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 141 (2023)
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived multi-charged particles in the full LHC Run 2  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **847**, 138316 (2023)
39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison of inclusive and photon-tagged jet suppression in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with ATLAS,” *Phys. Lett. B* **846**, 138154 (2023)

40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for excited  $\tau$ -leptons and leptoquarks in the final state with  $\tau$ -leptons and jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 199 (2023)
41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for third-generation vector-like leptons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 118 (2023)
42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of third-generation leptoquarks decaying into a bottom quark and a  $\tau$ -lepton with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **83**, 1075 (2023)
43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a light charged Higgs boson in  $t \rightarrow H^\pm b$  decays, with  $H^\pm \rightarrow cb$ , in the lepton+jets final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **09**, 004 (2023)
44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson into  $e\tau$  and  $\mu\tau$  in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 166 (2023)
45. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the suppression and correlations of dijets in Xe+Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.44$  TeV,” Phys. Rev. C **108**, 024906 (2023)
46. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of Single-Top-Quark Production in Association with a Photon Using the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **131**, 181901 (2023)
47. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production of a  $W$  boson in association with a charmed hadron in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **108**, 032012 (2023)
48. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Inclusive-photon production and its dependence on photon isolation in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of ATLAS data,” JHEP **07**, 086 (2023)
49. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and multiple jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **2306**, 200 (2023)
50. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavor-changing neutral-current couplings between the top quark and the  $Z$  boson with proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **108**, 032019 (2023)

51. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for invisible decays of the Higgs boson using 139 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV collected with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **842**, 137963 (2023)
52. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Model-independent search for the presence of new physics in events including  $H \rightarrow \gamma\gamma$  with  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp data recorded by the ATLAS detector at the LHC,” JHEP **07**, 176 (2023)
53. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exclusive Higgs and  $Z$  boson decays to  $\omega\gamma$  and Higgs boson decays to  $K^*\gamma$  with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **847**, 138292 (2023)
54. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new  $Z'$  gauge boson in  $4\mu$  events with the ATLAS experiment,” JHEP **07**, 090 (2023)
55. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the strong coupling constant from transverse energy–energy correlations in multijet events at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 085 (2023)
56. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross sections of Higgs boson production through gluon fusion in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **83**, 774 (2023)
57. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Calibration of the light-flavour jet mistagging efficiency of the  $b$ -tagging algorithms with  $Z$ +jets events using 139 fb<sup>-1</sup> of ATLAS proton–proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C **83**, 728 (2023)
58. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of Suppression of Large-Radius Jets and Its Dependence on Substructure in Pb+Pb Collisions at  $\sqrt{s}_{NN} = 5.02$  TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **131**, 172301 (2023)
59. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new scalar resonance in flavour-changing neutral-current top-quark decays  $t \rightarrow qX$  ( $q = u, c$ ), with  $X \rightarrow b\bar{b}$ , in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 199 (2023)
60. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for leptonic charge asymmetry in  $t\bar{t}W$  production in final states with three leptons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” JHEP **07**, 033 (2023)

61. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for nonresonant pair production of Higgs bosons in the  $b\bar{b}b\bar{b}$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **108**, 052003 (2023)
62. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in association with a photon with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **843**, 137848 (2023)
63. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 982 (2023)
64. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark photons from Higgs boson decays via  $ZH$  production with a photon plus missing transverse momentum signature from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 133 (2023)
65. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $Z\gamma$ +jets differential cross sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 072 (2023)
66. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of the muon momentum calibration and performance of the ATLAS detector with  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 686 (2023)
67. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP properties of Higgs boson interactions with  $\tau$ -leptons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 563 (2023)
68. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced vector-like top and bottom partners in events with large missing transverse momentum in  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 719 (2023)
69. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive pion pair production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 627 (2023)
70. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive  $t\bar{t}$  production cross section in the lepton+jets channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector using support vector machines,” *Phys. Rev. D* **108**, 032014 (2023)
71. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Tools for estimating fake/non-prompt lepton backgrounds with the ATLAS detector at the LHC,” *JINST* **18**, T11004 (2023)

72. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-hadron production in  $pp$ ,  $p$ +Pb, Pb+Pb, and Xe+Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *JHEP* **07**, 074 (2023)
73. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $Z\gamma\gamma$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 539 (2023)
74. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS flavour-tagging algorithms for the LHC Run 2  $pp$  collision dataset,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 681 (2023)
75. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a single top quark and an energetic  $W$  boson in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 603 (2023)
76. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of substructure-dependent jet suppression in Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **107**, 054909 (2023)
77. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of gauge boson joint-polarisation states in  $W^\pm Z$  production from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **843**, 137895 (2023)
78. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in multi-body invariant masses in events with at least one isolated lepton and two jets using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton–proton collision data collected by the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 202 (2023)
79. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and three or more b-jets in  $139 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 561 (2023)
80. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged Higgs boson production in multi-lepton final states using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 605 (2023)
81. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a dark Higgs boson decaying into  $W^+W^-$  in the one-lepton final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions recorded with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 116 (2023)
82. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on spin-0 dark matter mediators and invisible Higgs decays using AT-

LAS 13 TeV  $pp$  collision data with two top quarks and missing transverse momentum in the final state,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 503 (2023)

83. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for boosted diphoton resonances in the 10 to 70 GeV mass range using  $138 \text{ fb}^{-1}$  of 13 TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 155 (2023)
84. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for heavy Higgs bosons decaying into vector bosons in same-sign two-lepton final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 200 (2023)
85. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for  $t\bar{t}H/A \rightarrow t\bar{t}\bar{t}\bar{t}$  production in the multilepton final state in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 203 (2023)
86. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on the Higgs boson self-coupling from single- and double-Higgs production with the ATLAS detector using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *Phys. Lett. B* **843**, 137745 (2023)
87. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-production of vector-like quarks in  $pp$  collision events at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with at least one leptonically decaying  $Z$  boson and a third-generation quark with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **843**, 138019 (2023)
88. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in association with a vector boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 519 (2023)
89. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced scalar and vector leptoquarks decaying into third-generation quarks and first- or second-generation leptons in  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **2306**, 188 (2023)
90. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for new resonances in multiple final states with a high transverse momentum  $Z$  boson in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 036 (2023)
91. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the polarisation of  $W$  bosons produced in top-quark decays using dilepton events at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **843**, 137829 (2023)
92. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct pair production of sleptons and charginos decaying to two leptons

and neutralinos with mass splittings near the  $W$ -boson mass in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 031 (2023)

93. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the  $b\bar{b}\tau^+\tau^-$  decay channel using 13 TeV  $pp$  collision data from the ATLAS detector,” JHEP **07**, 040 (2023)
94. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in the s-channel in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 191 (2023)
95. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of observables sensitive to colour reconnection in  $t\bar{t}$  events with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C **83**, 518 (2023)
96. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced photons produced in exotic decays of the Higgs boson using 13 TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **108**, 032016 (2023)
97. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top-quark mass using a leptonic invariant mass in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 019 (2023)
98. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of electroweak  $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$  production and limits on anomalous quartic gauge couplings in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 082 (2023)
99. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the charge asymmetry in  $pp \rightarrow t\bar{t}$  production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **08**, 077 (2023)
100. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current interactions of the top quark and the Higgs boson in events with a pair of  $\tau$ -leptons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **2306**, 155 (2023)
101. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into a vector quarkonium state and a photon using 139 fb $^{-1}$  of ATLAS  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton–proton collision data,” Eur. Phys. J. C **83**, 781 (2023)
102. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP Invariance in Higgs Boson Vector-Boson-Fusion Production Using the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Channel with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **131**, 061802 (2023)

103. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Exclusive dielectron production in ultraperipheral Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s}_{NN} = 5.02$  TeV with ATLAS,” JHEP **2306**, 182 (2023)
104. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section and  $\rho$ -parameter from elastic scattering in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **83**, 441 (2023)
105. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total and differential Higgs boson production cross-sections at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector by combining the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  decay channels,” JHEP **05**, 028 (2023)
106. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant  $WZ$  production in the fully leptonic final state in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **83**, 633 (2023)
107. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 138 (2023)
108. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a  $Z$  or  $W$  boson and a Higgs boson in final states with leptons and  $b$ -jets in  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 016 (2023)
109. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson production by gluon-gluon fusion and vector-boson fusion using  $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  decays in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **108**, 032005 (2023)
110. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the properties of Higgs boson production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channel using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data with the ATLAS experiment,” JHEP **07**, 088 (2023)
111. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions recorded by the ATLAS detector at the LHC,” Phys. Lett. B **843**, 137880 (2023)
112. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $W^+W^-$  production in decay topologies inspired by searches for electroweak supersymmetry,” Eur. Phys. J. C **83**, 718 (2023)
113. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of muon pairs produced via  $\gamma\gamma$  scattering in nonultraperipheral Pb+Pb

- collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **107**, 054907 (2023)
114. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles that decay to collimated pairs of leptons or light hadrons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 153 (2023)
  115. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with photons, jets and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 021 (2023)
  116. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Strong Constraints on Jet Quenching in Centrality-Dependent  $p+$  Pb Collisions at 5.02 TeV from ATLAS,” Phys. Rev. Lett. **131**, 072301 (2023)
  117. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combination of inclusive top-quark pair production cross-section measurements using ATLAS and CMS data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” JHEP **07**, 213 (2023)
  118. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy, long-lived, charged particles with large ionisation energy loss in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS experiment and the full Run 2 dataset,” JHEP **2306**, 158 (2023)
  119. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Production of  $\Upsilon(nS)$  mesons in Pb+Pb and  $pp$  collisions at 5.02 TeV,” Phys. Rev. C **107**, 054912 (2023)
  120. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral-current couplings between the top quark and the photon with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Phys. Lett. B **842**, 137379 (2023) [erratum: Phys. Lett. B **847**, 138286 (2024)]
  121. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Cross-section measurements for the production of a Z boson in association with high-transverse-momentum jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **06**, 080 (2023)
  122. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential  $t\bar{t}$  cross-section measurements using boosted top quarks in the all-hadronic final state with  $139 \text{ fb}^{-1}$  of ATLAS data,” JHEP **04**, 080 (2023)
  123. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the suppression and correlations of dijets in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” Phys. Rev. C **107**, 054908 (2023) [erratum: Phys. Rev. C **109**, 029901 (2024)]

124. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Correlations between flow and transverse momentum in Xe+Xe and Pb+Pb collisions at the LHC with the ATLAS detector: A probe of the heavy-ion initial state and nuclear deformation,” *Phys. Rev. C* **107**, 054910 (2023)
125. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the  $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$  Process in Pb+Pb Collisions and Constraints on the  $\tau$ -Lepton Anomalous Magnetic Moment with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 151802 (2023)
126. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor of  $b$ -jets in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 438 (2023)
127. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for new phenomena in events with two leptons, jets, and missing transverse momentum in  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 515 (2023)
128. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of cross-sections for production of a  $Z$  boson in association with a flavor-inclusive or doubly  $b$ -tagged large-radius jet in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **108**, 012022 (2023)
129. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Heavy Neutral Leptons in Decays of  $W$  Bosons Using a Dilepton Displaced Vertex in  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, 061803 (2023)
130. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the charged-lepton-flavor-violating decay  $Z \rightarrow e\mu$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **108**, 032015 (2023)
131. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of two jets and a  $Z$ -boson pair,” *Nature Phys.* **19**, 237-253 (2023)
132. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour violation in high-mass dilepton final states using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *JHEP* **23**, 082 (2020)
133. I. Kopsalis, *et al.* (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii), “Establishing the Quality Assurance programme for the strip sensor production of the ATLAS tracker upgrade including irradiation with neutrons, photons and protons to HL-LHC fluences”, *JINST* **18**, C05009 (2023).
134. V. Latonova, *et al.* (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii), “Characterization of the polysilicon resistor in silicon strip sensors for ATLAS inner tracker as a function of tempera-

ture, pre- and post-irradiation”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1050**, 168119 (2023).

135. A. Umemoto, T. Iida, *et al.*, “Basic characteristics of synthetic-diamond scintillator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1057, (2023), 168789
136. Takumi Omori, Takashi Iida, Hisanori Suzuki *et al.*, “First Study of the PIKACHU Project: Development and Evaluation of High-Purity  $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}:Ce$  Crystals for  $^{160}Gd$  Double Beta Decay Search”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2024, Issue 3, March 2024, 033D01
137. C.D. Shin, T. Iida, Y. Takeuchi *et al.* (JSNS2 collaboration), “The acrylic vessel for JSNS<sup>2</sup>-II neutrino target”, JINST **18**, T12001 (2023)

(国際会議報告, 査読なし論文, 解説記事等)

1. T. Imamura, S. Kita, K. Nakamura and K. Hara, “Development of HPK Capacitive Coupled LGAD (AC-LGAD) detectors,” PoS VERTEX2023, 032 (2024)
2. S. Kita, K. Nakamura, T. Imamura, I. Goya and K. Hara, “Development of AC-LGAD Detector with Finer Pitch Electrodes for High Energy Physics Experiments,” JPS Conf. Proc. **42**, 011030 (2024)
3. 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 吉田拓生, 他 COBAND Collaboration, “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験”, 観測ロケットシンポジウム 2021 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2022 SA6000185010, II-4 (2023)
4. Y. Takeuchi, S. Matsuura, S. Kim, T. Iida, “Search for the radiative decay of the cosmic neutrino background by spectral measurements of the cosmic infrared background”, PRIMA General Observer Science Book, 63–66. arXiv:2310.20572 [astro-ph.IM] (2023), DOI: 10.48550/arXiv.2310.20572
5. Y. Minami, T. Iida *et al.*, “Status of the search for  $^{48}Ca$  double beta decay with CANDLES”, Proceedings of Science (PoS)/(414)/p.1142, 2023-06
6. T. Dodo, T. Iida, Y. Takeuchi *et al.* (JSNS2 collaboration), “Pulse Shape Discrimination in JSNS<sup>2</sup>”, arXiv:2404.03679

〈学会・研究会発表〉

(国内)

1. 廣瀬茂輝：ATLAS 実験 最高エネルギー実験で高エネルギー現象を直接探る, 第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023(2023 年 5 月 18-20 日), 琵琶湖コンファレンスセンター (招待講義)
2. 今村友香：LGAD 検出器の放射線耐性に関する改善と研究, 第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023(2023 年 5 月 18-20 日), 琵琶湖コンファレンスセンター

3. 北彩友海：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の時間分解能に関する研究,  
第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023(2023 年 5 月 18-20 日), 琵琶湖コンファレンスセンター
4. 大森匠：PIKACHU 実験による  $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索と高純度 GAGG 結晶開発の現状,  
第 11 回高エネルギー物理春の学校 2023(2023 年 5 月 18-20 日), 琵琶湖コンファレンスセンター
5. 飯田崇史：PIKACHU 実験による Gd-160 の二重ベータ崩壊探索,  
宇宙史研究センター 2023 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2023 年 6 月 27 日), 筑波大学
6. 鈴木尚紀：TCAD シミュレーションを用いた ATLAS 実験 SCT 検出器の放射線損傷の評価,  
宇宙史研究センター 2023 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2023 年 6 月 27 日), 筑波大学
7. 佐藤構二：ATLAS 実験の最近の物理成果から,  
宇宙史研究センター 2023 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2023 年 6 月 27 日), 筑波大学
8. 飯田崇史： $^{48}\text{Ca}$  の極稀崩壊研究のための検出システム高感度化,  
第 60 回アイソトープ・放射線研究発表会 アイソトープ協会奨励賞受賞講演, 2023 年 7 月 6 日 日本科学未来館・未来館ホール (招待講演)
9. 鈴木尚紀：PIKACHU 実験  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  連続崩壊事象における機械学習を用いた波形パターン選別,  
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2023), 2023 年 8 月 7~9 日 下呂温泉 (ポスター)
10. 大森匠： $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索に向けた PIKACHU 実験用高純度 GAGG 結晶の開発と性能評価,  
シンチレータ研究会 SMART2023, 2023 年 8 月 7-9 日 下呂温泉 (招待講演)
11. 廣瀬茂輝：LHC からの最新物理結果と Run 3 の状況,  
基研研究会 素粒子物理学の進展 2023(2023 年 8 月 28 日-9 月 1 日), 京都大学 (招待講演)
12. 廣瀬茂輝：LHC Run 3 と高輝度 LHC におけるヒッグスセクター全容解明への挑戦 (一般シンポジウム講演),  
日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日), 東北大学 (招待講演)
13. 柳瀬健太郎：HL-LHC ATLAS 実験に向けたワイヤプロテクション付き ITk ピクセルモジュールの熱サイクルおよび放射線耐性評価,  
日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日), 東北大学

14. 比江森友太：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュールの試験量産品組み立て前品質評価,  
日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日), 東北大学
15. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュールの試験量産品組み立て前品質評価,  
日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日), 東北大学
16. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索における光学機器開発,  
日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日), 東北大学
17. 飯田崇史：PIKACHU 実験による  $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊研究と、機械学習を用いた  
次世代シンチレータ材料開発,  
岡山大学理学部講演会, 2023 年 10 月 19 日 岡山大学津島キャンパス
18. 飯田崇史：放射線粒子の色を見る！革新的シンチレーション検出器の開発,  
画像科学奨励賞 30 周年記念発表会「受賞者のアイデアが光る 30 周年、未来を照らす」,  
2023 年 11 月 22 日 (ポスター)
19. 廣瀬茂輝：LHC ATLAS 実験 Run3 の状況と最新物理結果 –ヒッグス精密測定を中心  
に–,  
宇宙史研究センター 2023 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2023 年 12 月 18  
日), 筑波大学
20. 武内勇司：Hf-STJ development for COBAND – I-V characteristics studies –,  
宇宙史研究センター 2023 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2023 年 12 月 18  
日), 筑波大学
21. 飯田崇史：シンチレータを用いた二重ベータ崩壊探索の現状と、求めるシンチレータ  
材料について,  
日本結晶成長学会・バルク成長分科会 第 115 回研究会, 2024 年 2 月 21 日 東北大  
学片平キャンパス金属材料研究所 2 号館 (招待講演)
22. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索に用いる遠赤外用サブミリサイズ集光器  
の開発,  
令和 5 年度第 2 回筑波大学次世代研究者挑戦的研究プログラム研究発表会 (2024 年 3  
月 1 日), つくば国際会議場
23. 大森匠：PIKACHU 実験による  $^{160}\text{Gd}$  二重ベータ崩壊探索,  
第 4 回新学術「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」若手研究会, 2024 年 3  
月 7-8 日 東北大学青葉山北キャンパス理学研究科合同 C 棟 N204 号室
24. 大森匠：PIKACHU 実験による  $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索に向けた高純度 GAGG  
結晶の開発,  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日), 筑波大学
25. 西野純矢：高い時間分解能を持つ半導体検出器 (LGAD) のシミュレーションによる理  
解および測定システムの改善,  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日), 筑波大学

26. 堀越一生：高い時間分解能を持つ AC-LGAD 検出器の増幅率および時間分解能の研究，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
27. 今村友香：高い時間分解能を持つ LGAD 検出器の開発と研究，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
28. 菅原里菜：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器量産のための外観検査システムの改善と試験量産品のバンプ接続状況の評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
29. 熊山拓海：HHL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器モジュール量産に向けたフレキシブル基板の品質検査システム開発，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
30. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用シリコンピクセル検出器モジュール試験量産品の組み立て前形状測定とテストビームによる検出効率の評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
31. 能瀬大翔：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器量産に向けた 試験量産品のノイズ評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
32. 前山滉太朗：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器量産に向けた 試験量産品のノイズ評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
33. 比江森友太：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの CMOS 検出器 MALTA2 を用いたテストビームによる性能評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
34. 王生尚志：COBAND 実験に向けた高利得・広帯域な極低温電荷積分型増幅器の性能評価，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
35. 柏木隆城：COBAND 実験のための遠赤外波長用サブミリサイズ集光器の開発，  
2023 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門 (2024 年 3 月 15 日)，筑波大学
36. 北彩友海：LHC Run3 運転における高パイルアップ運転環境下での ATLAS シリコンストリップ検出器データ転送量評価，  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日)，オンライン開催
37. 前山滉太朗：高輝度 LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの量産時性能評価と 70 MeV 陽子線を用いた照射量依存性に関する研究，  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日)，オンライン開催
38. 能瀬大翔：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器量産に向けた試験量産品のノイズ評価，  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日)，オンライン開催

39. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用シリコンピクセル検出器モジュール試験量産品の組み立て前形状測定とテストビームによる検出効率の評価,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
40. 熊山拓海：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器モジュール量産に向けたフレキシブル基板の品質検査システム開発,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
41. 菅原里菜：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器モジュール量産のための外観検査システムの改善と試験量産品のバンパ接続状況の評価,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
42. 廣瀬茂輝：高輝度 LHC-ATLAS 用シリコンピクセル検出器試験量産のまとめと本量産に向けた準備状況,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
43. 王生尚志：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XVI,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
44. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索における SiO<sub>2</sub> 集光器の開発と Nb の光学定数測定,  
日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
45. 大森匠：PIKACHU 実験による <sup>160</sup>Gd の二重ベータ崩壊探索 6 ～GAGG 結晶の高純度化の現状～,  
日本物理学会 2024 年 春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催
46. 鈴木尚紀：PIKACHU 実験による <sup>160</sup>Gd の二重ベータ崩壊探索 7 ～結晶内部の Bi-Po 連続崩壊事象の解析～,  
日本物理学会 2024 年 春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日), オンライン開催

(国際会議・研究会)

1. C. Asano, (Poster presentation) “X-ray Test of Hf-STJ Developed for Cosmic Background Neutrino Decay Experiment”,  
the 20th International Conference on Low Temperature Detectors (LTD-20), Jul. 23-28, 2023, Daejeon Convention Center(DCC) in Daejeon, South Korea
2. Takashi Iida, “The PIKACHU experiment - challenge to discover  $2\nu\beta\beta$  of <sup>160</sup>Gd ?”,  
Theoretical and Experimental Approaches for Nuclear Matrix Elements of Double Beta Decays (NME23), (2023 年 12 月 21-22 日), RCNP, Osaka University, Osaka (ハイブリッド) (招待講演)
3. Takashi Iida, “The PIKACHU experiment for the study of <sup>160</sup>Gd double beta decay”,  
Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2024), (2024 年 3 月 4-6 日), Tohoku University, Sendai (招待講演)

4. Takashi Iida, “Status of the PIKACHU experiment for  $^{160}\text{Gd}$  double beta decay search”,  
International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science” (DBD23),  
(2023年12月1-3日), Hilton Waikoloa, Hawaii (ポスター)
5. Hisanori Suzuki, “Pulse shape analysis of Bi-Po sequential decays with machine learning and estimation of Th/U impurities in GAGG crystal in the PIKACHU experiment”,  
International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science” (DBD23),  
(2023年12月1-3日), Hilton Waikoloa, Hawaii (ポスター)

### 〈社会貢献〉

1. 科学技術週間展示「キッズ・ユニバーシティ」：宇宙の歴史の暗黒部分を解明する，  
2023年4月22日，筑波大学
2. 筑波大学公開講座「宇宙の歴史」，2023年5月27-28日，筑波大学春日キャンパス  
受川 史彦：素粒子の質量とヒッグス粒子  
武内 勇司：宇宙背景ニュートリノへの挑戦
3. 雙峰祭 学術企画展示：宇宙の歴史の暗黒部分を解明する，  
2023年11月4-5日，筑波大学 3B401

### 〈学位論文〉

#### (修士論文)

大学院 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム，2024年2月

1. 今村 友香：高い放射線耐性を持つ LGAD 検出器の開発と研究
2. 大森 匠：GeV 電子ビームに最適化した SOI ピクセル検出器 INTPIX4NA を用いた  
テレスコープシステムの開発
3. 倉持 花梨：高輝度 LHC-ATLAS ピクセル検出器試験量産モジュールの品質管理シス  
テム構築とテストビームを用いた検出効率の評価
4. 比江森 友太：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの熱サイクル耐性および  
CMOS 検出器 MALTA2 を用いたテストビームによる性能評価
5. 柳瀬 健太郎：HL-LHC ATLAS 実験 ITk ピクセル検出器外層用モジュールの運用に向  
けた実験環境耐性およびデータ収集システムの性能評価