

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
特令教授	金 信弘
客員准教授	池上 陽一 (KEK)
大学院生	17名
学群4年次生	1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、特に、ヒッグス粒子を手掛かりとして、素粒子標準理論の検証とそれを超える新粒子や物理法則の探索を行っている。また、ニュートリノの性質を精査する目的で、宇宙背景ニュートリノ探索実験 COBAND、およびマヨラナ性を探るための二重ベータ崩壊探索実験 PIKACHU を推進している。これらの実験のため、高分解能を持つ超伝導光検出器 STJ や新型シンチレータの開発を行っている。さらに、将来の高エネルギー・高輝度加速器実験に向けて、LGAD や CMOS 技術を用いた次世代半導体粒子検出器の開発も進めている。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を誇る陽子・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、新物理の探索など多岐にわたる素粒子物理の研究を進めている。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 で衝突実験を行い、2026 年夏まで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、2030 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(High Luminosity-LHC) 実験を開始する。

2024 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を公表した。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進み、Run-3 データを解析した物理結果もいくつか公表されている。筑波大学グループは、ATLAS 実験開始以来、ヒッグス粒子の研究に貢献してきた。ここでは、最近の ATLAS 実験のヒッグス粒子に関する研究結果中から、もっとも興味深い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 2030 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発にも取り組んでいる。

(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 fb^{-1} 、 20.3 fb^{-1} 、Run-2 では 13 TeV のデータを 139 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。2025 年 6 月現在で、Run-3 運転において ATLAS 検出器が記録したデータ量は 206 fb^{-1} に達している。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。

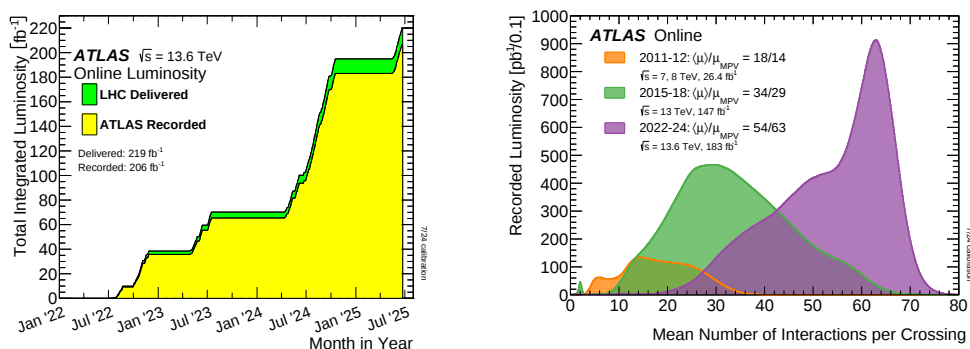


図 1: ATLAS 実験のデータ取得の状況。(左) 加速器が配った積算輝度と、ATLAS 検出器で記録した積算輝度の推移。(右) バンチクロッシングごとの陽子・陽子衝突の反応数の分布。Run ごとの分布を比較のために重ねて表示している。

今後は、2026 年夏まで Run-3 実験を続行し、継続する。2026 年夏-2029 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、2030 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 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、ATLAS 実験における最新の測定結果として、ヒッグス粒子のさまざまな生成過程における断面積と崩壊モードごとの分岐比を示す。

ヒッグス粒子の重要な性質の一つは、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に関する ATLAS 実験の最新の測定結果を示す。Run-2 データの解析により測定精度は向上しており、現在のところこれらの測定結果は標準理論の予測と良好によく一致している。

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

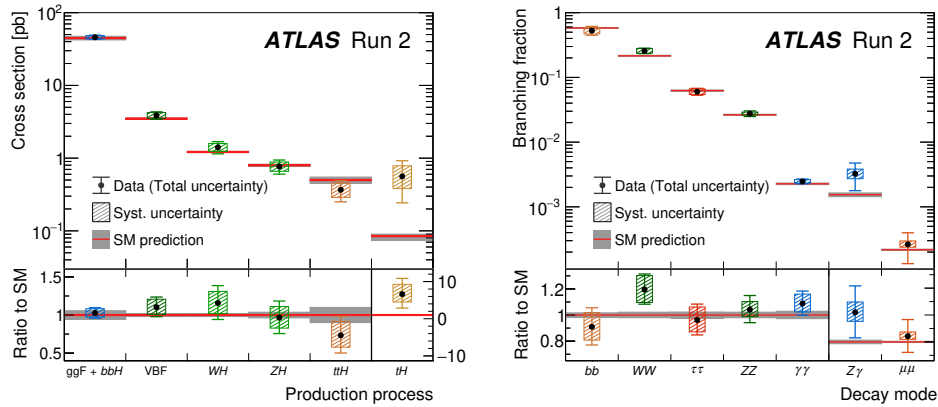


図 2: さまざまな過程でのヒッグス粒子の（左）生成断面積と（右）崩壊分岐比の測定結果。

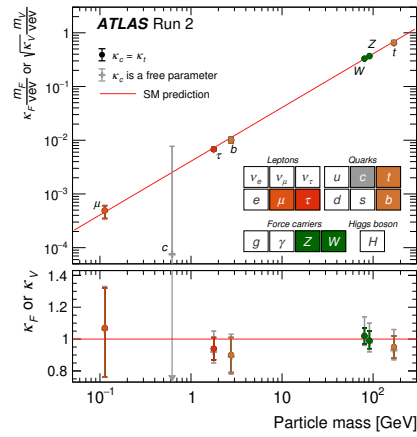


図 3: ヒッグス粒子のさまざまな粒子との結合の強さの測定結果。さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

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。

(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 2 ヒッグス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 $HH \rightarrow$

ATLAS Run 2

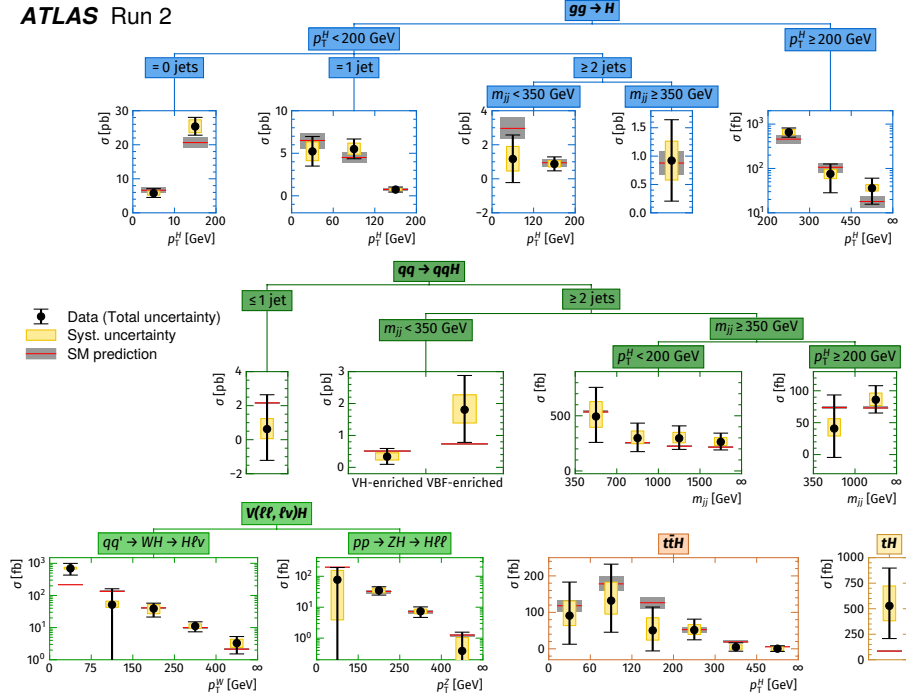


図 4: ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

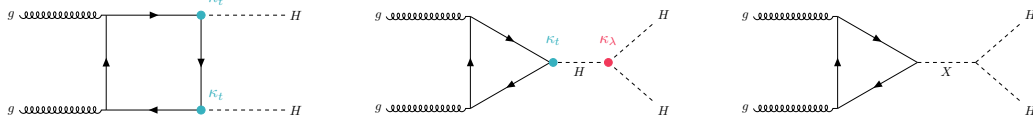


図 5: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

$b\bar{b}\tau\tau$, $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, $HH \rightarrow VVV'V'$ (V, V' は、 Z または W ボソン), $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-/b\bar{b}ZZ$ 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は確認されなかった。これら解析で得られた 2 ヒッグス事象の生成断面積の上限値を標準理論の予言値で規格化して示したのが図 6 (左) である。5 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(左) と (中) の過程が混ざりあって 2 ヒッグス事象は生成される。ヒッグス粒子の自己結合の強さ (λ) の値が標準理論からずれていれば、この混ざり具合が変わり、事象の特徴も標準理論から違った振る舞いとなる。図 6 (右) は、さまざまな自己結合 λ 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、 $-1.2 < \kappa_\lambda < 7.2$ と得られた。

Run-3 および今後の HL-LHC 実験において豊富なデータを蓄積し、ヒッグス粒子が 2 個同時に生成される事象 (2 ヒッグス事象) を検出してその自己相互作用を測定することは、標準理論の新たな側面を検証する上で極めて重要である。

ATLAS 実験では、Run-3 のデータを用いたはじめての 2 ヒッグス事象探索解析の暫定結果も、本稿執筆直前の 2025 年 5 月に公表した。今回公表したのは、Run-2、Run-3 で得られたそれぞれ 140 fb^{-1} 、 168 fb^{-1} のデータを解析した $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 過程の探索結果である。

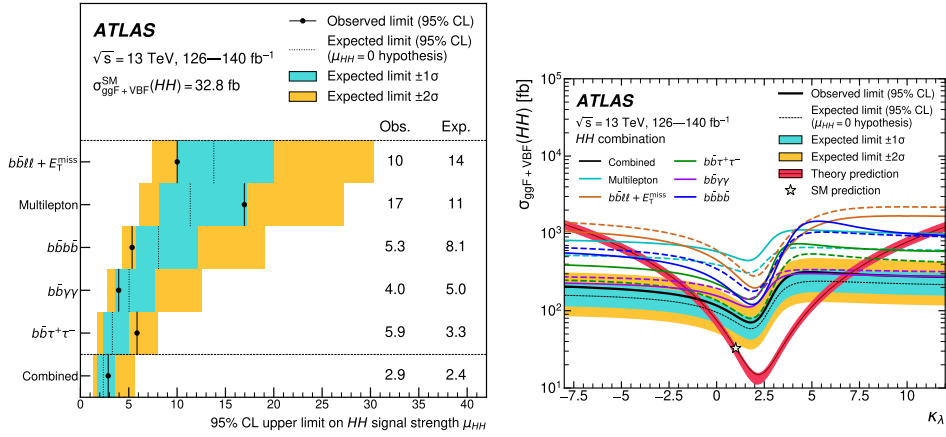


図 6: Run-2 と Run-3 データを解析した $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 過程の探索結果。(左) 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。Run ごとに独立に解析した結果と、全データをコンバインした結果を示す。(右) 自己結合に対する尤度スキャンの結果。自己結合の値は、標準理論の値との比 $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM})$ で表示している。

解析で得られた 2 ヒッグス過程の生成断面積への上限と、自己結合に関する尤度スキャンの結果を図 7 に示す。この解析では、 b クォーク起源のジェット (b ジェット) を同定する b タグ・アルゴリズムを改良し、事象を運動学的フィットすることで b ジェット運動量の測定精度を改善したなど、Run-2 データのみの解析と比べ、解析手法にいくつかの改良を行った。Run-3 データが増えたことによるだけでなく、解析手法自体の改善も貢献して、 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 過程の解析による 2 ヒッグス事象の生成断面積上限は大きく引き下げられた¹。この単独チャンネルで、 $-1.7 < \kappa_\lambda < 6.6$ (95% 信頼区間) の制約を得た。

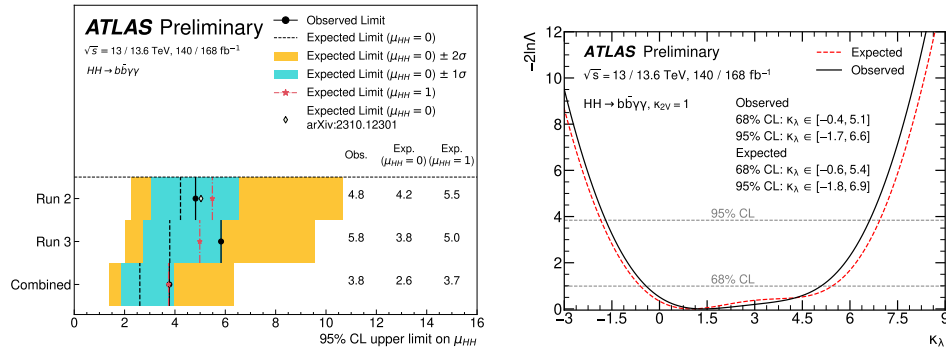


図 7: Run-2 と Run-3 データを解析した $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 過程の探索結果。(左) 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。Run ごとに独立に解析した結果と、全データをコンバインした結果を示す。(右) 自己結合に対する尤度スキャンの結果。自己結合の値は、標準理論の値との比 $\kappa_\lambda (= \lambda/\lambda^{SM})$ で表示している。

¹図 6 (左) 中の“Exp.”、図 7 (左) 中の“Exp. ($\mu_{HH} = 0$)” は、2 ヒッグス事象信号が存在せずデータがバックグラウンドだけからなる場合の信号断面積に対する上限の期待値であり、解析の性能を表す（低いほど性能が良い）。

(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粒子は1種類のみが存在が予言されており、これまでの実験で確認されているのもその1種類に限られている。一方で、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。すでに発見されているのとは別のヒッグス粒子を探すことは、最高エネルギーの加速器実験における重要な課題の一つである。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つ導入し、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。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、標準理論よりも拡張したヒッグス・セクターを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をはじめ、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 と正負の荷電を持った荷電ヒッグス粒子 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_{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。

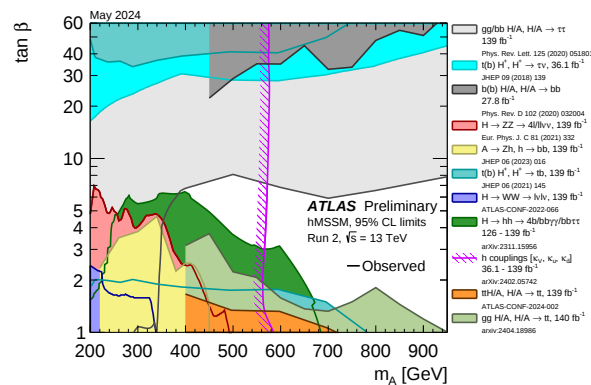


図 8: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された $125\text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

【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(2022–2026)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。

LHC Run 3 の前半戦である 2022 年と 2023 年は、加速器の立ち上げに加えて大きなトラブルなどもあり、合計 65 fb^{-1} のデータ収集に留まった（当初予定は約 120 fb^{-1} ）。2024 年はより多くのデータを収集するべく、例年より早く 5 月初めには最大ルミノシティである $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達、その後 10 月までほぼ間断なくデータ収集を続けた。結局、2024 年のデータ収集は非常に快調で、ATLAS 実験では 2022–2023 年のほぼ 2 倍にあたる、 118 fb^{-1} を収集した（図 9）。

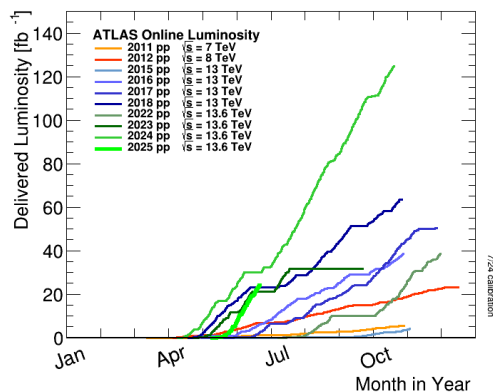


図 9: LHC が ATLAS に供給した、年ごとの積分ルミノシティ [Public ATLAS Online Luminosity Plots for Run-3 of the LHC webpage]。2024 年（緑）は 120 fb^{-1} 近くに達し、これまでの年間積分ルミノシティと比べて突出している。

高いデータ転送レートでの休まないデータ収集は、経年劣化の否めない SCT の DAQ システムに高い負荷をもたらし、これまでに経験したことのない問題を引き起こすこともあった。例えば、8 つある SCT 用 DAQ クレート²のうち 1 台において、そこに搭載された複数の ROD が一斉にビジー信号を発出して ATLAS 全体の DAQ を止めてしまうということが、ある時から数日に一度程度発生するようになった。しばらくの間原因がわからず、その都度エキスパートが深夜でも迅速に対処してデータ収集への影響を最小限に抑えるしかなかったのであるが、9 月に行った集中的な調査において、ATLAS 全体のグローバル DAQ と SCT DAQ との間でのタイミング同期やトリガー中継の役割を担うモジュール（timing interface module; TIM）に問題があることがわかり、新しいものに交換することで解決した。また、それ以外の ROD でもビジー信号の発出が前年に比べて増加したが、これについては ROD 間でのデータ処理量が均等になるようにケーブルをつなぎ変えることで対処した。このほかにも、細かいエラーが以前に比べて頻発するようになり、その都度フロントエンド回路のバイアス電圧を調整したり、状態の悪い SCT モジュールを停止したりすることで、対処する必要があった。

SCT は、2023 年末の時点で $\sim 6 \times 10^{13} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 相当の放射線を受け、シリコンセンサーに対する放射線損傷の影響が顕著になっている。図 10 に示したように、95% の荷電粒子検出効率を得るために必要な電圧は、概ね $1 \text{ V}/\text{fb}^{-1}$ のペースで上がっている。2024 年に大量のデータを取得したということは、それだけ放射線損傷を受けているということにもなる。現在の SCT センサーの状態をより正確に理解し、今後の性能変化に備えるため、様々なセンサー特性を測定した。特に、2024 年には SCT 運転開始以降初めてセンサーの電荷収

²1 台の DAQ クレートには 16 枚の後段読み出し回路（readout driver; ROD）が配置され、1 枚の ROD は約 32 台の SCT モジュールへのクロック及びトリガー分配と、モジュールから転送されてきたデータの処理を担う。合計 128 枚の ROD で全 4,088 台の SCT モジュールをカバーする。

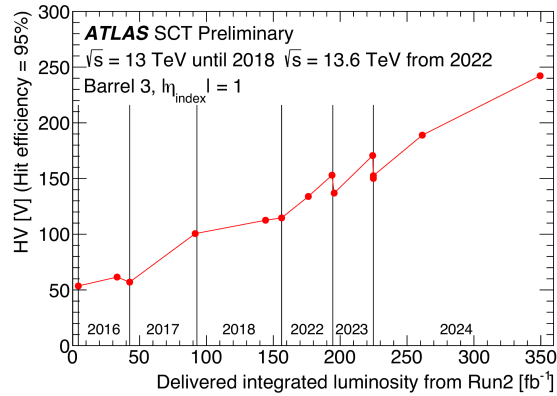


図 10: Run 2 初期からの、積分ルミノシティに対する 95%検出効率を維持するのに必要なバイアス電圧の変遷 [ATLAS, SCT-2024-002]。

集効率の評価を行った。SCT モジュールでは、センサーから出てきた電荷信号を集積回路 (ABCD3TA) ですぐにデジタル化してしまうため、ある閾値 (通常 1 fC) に対して十分な電荷量が検出されたか/されなかったかというバイナリ情報しか取得できない。ここで、閾値を変えながら荷電粒子の検出効率を測定すると、検出効率が 50% になるような閾値から、電荷収集量の平均値を決めることができる。さらに、検出器の ϕ 方向に対して放射線量はほぼ一様であることを利用し、図 11(左) のように領域を区切ってバイアス電圧を変えることで、電荷収集量のバイアス電圧依存性も測定することができる。2024 年 5 月 (2024 年のデータ収集開始直後) と 10 月 (データ収集終了直前) に、このように領域ごとに異なるバイアス電圧を印加した上での閾値スキャンを提案し、実際に実行した。このデータから得られた結果を図 11(右) に示す。想定された通り、1 年間の運転で顕著な電荷収集量の低下が見られた。

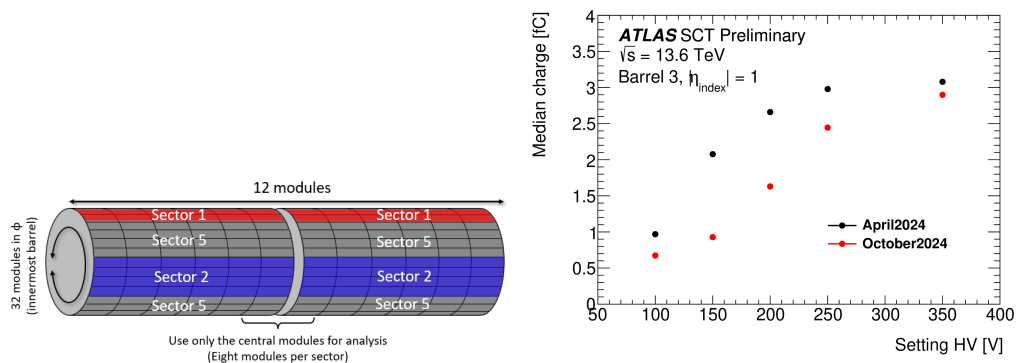


図 11: SCT での電荷収集量測定。(左) 電荷収集量測定の対象とした、SCT バレル部最内層の模式図。“Sector” ごとに異なるバイアス電圧をかける。(右) 電荷収集量の測定結果 [ATLAS, SCT-2024-002]。

SCT の運転は 2026 年 6 月まで続く。SCT はシステムとしてかなり洗練されているが、今後も放射線損傷はさらに蓄積し、性能は徐々に低下していくため、早めの対策が不可欠である。2024 年の終わりには冷却温度を約 3°C 下げ、漏れ電流を抑制した。2025 年度も、検出器性能を丁寧にモニタし、適宜運転パラメータの調整をしながら、高品質なデータ取得に貢

献していく。

【3】 高輝度 LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発

2030 年より、LHC は瞬間ルミノシティを $5 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ 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。バレル部全 9 層のうち、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 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、2029 年までの完成・インストールを目指していよいよ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) ITk シリコンストリップ検出器用センサー量産

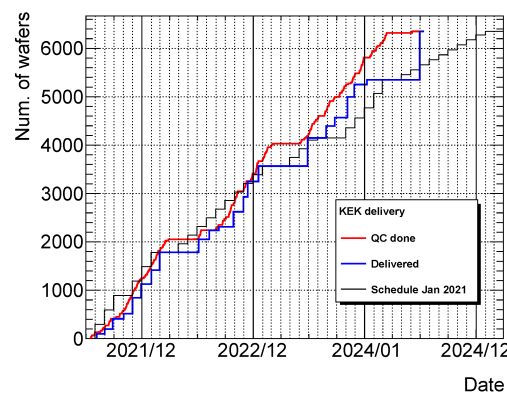


図 12: シストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数（赤実線）および納入枚数（青実線）の推移（日本担当分のみ）。青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す。

ITk ストリップ検出器には 2 万枚以上のストリップセンサーが必要となるが、そのうち日本グループは約 3 割に相当する 6,350 枚のセンサー量産を担当し、2021 年 7 月より量産作業を行ってきた。図 12 に示したセンサー納品状況の通り、2024 年 6 月について日本担当分全数の納品および量産時検査が完了した。この量産期間中、ストリップセンサーが ITk 検出器に使えるものかどうかを確かめるため、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品質検査を担当してきた。この品質検査は、

- シリコンセンサーの形状測定およびストリップ特性測定（全センサーに対する品質検査）。
- 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（およそ 40 ウェハーにつき 1 枚のサンプリング検査）。東北大学 RARiS サイクロトロンからの 70 MeV 陽子ビームを利用する。

の観点で行い、いずれも量産全期間にわたって非常に安定したセンサー特性を確認した。

一連の量産時性能評価の中で、特に放射線損傷後の特性について、我々は以下の点においてより詳細な調査をし、センサーからのデータを得ておくことが有用であると考えた。

1. 量産時検査では、ストリップ間抵抗³を専用のテスト構造体を用いて評価する。しかし、このテスト構造は、実際のストリップセンサーとは異なる構造を持っており、特にストリップ間抵抗に関して、測定用構造体の問題による漏れ電流により、測定値を過小評価していることが推察された。そこで、電荷収集量の評価に用いるミニセンサー（1 cm 角で、実物のストリップセンサーと同じ構造を持つ）を用いてストリップ間抵抗を測定し、テスト構造から得られたストリップ間抵抗と比較することにした。
2. 電荷収集量は、シリコンセンサーの荷電粒子検出効率を決める最重要指標である。量産時検査では、ミニセンサーに対してストロンチウム 90 からの β 線を照射し、その時に得られた電荷量を測定していた。一方で、この β 線は最大 2.3 MeV のなだらかなエネルギー分布を持ち、多くの粒子は最小電離粒子（電子の場合概ね 1 MeV）よりも低いエネルギーを持つ。そこで、十分高いエネルギーを持つ 3 GeV 電子ビームを照射し、 β 線を用いた電荷収集効率と比較することで、量産時検査の結果と高エネルギー粒子に対する結果を比較することにした。

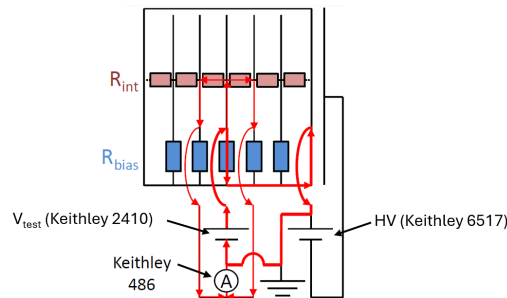


図 13: ミニセンサーによるストリップ間抵抗測定のための等価回路。赤い矢印は、電流の流れを示す。

ミニセンサーを用いたストリップ間抵抗の評価のため、図 13 に示すような回路を持った基板を製作した。

- ストリップ間抵抗に対し、バイアス抵抗の方が $O(100)$ 分の一と非常に小さいため、こちらを流れる電流の方が大きい。この電流が、ピコアンメータに流れないように誘導する。
- さらに、バルク部の漏れ電流はストリップ間電流の $O(10,000)$ 倍であり、わずかな寄与が結果を大きくゆがめてしまう。そこで、バイアス電圧部のグラウンドとテスト回路部のグラウンドを強固に接続し、両者を同電位とすることで漏れ電流の流入を防ぐ。

70 MeV 陽子線を $1.4 \times 10^{-15} n_{eq}/cm^2$ まで照射した 2 個のミニセンサーを用い、ストリップ間抵抗を測定した結果を図 14(左) に示した。ここで、「テストチップ」による測定結果（横

³ストリップ間抵抗は、ストリップ間の信号のクロストークを抑制するために重要である。信号電荷による電流が隣接ストリップではなく、バイアス抵抗（ $\sim 1.5 M\Omega$ ）を介してバイアスリングに流れるには、ストリップ間抵抗はバイアス抵抗に対して十分に高い必要がある。

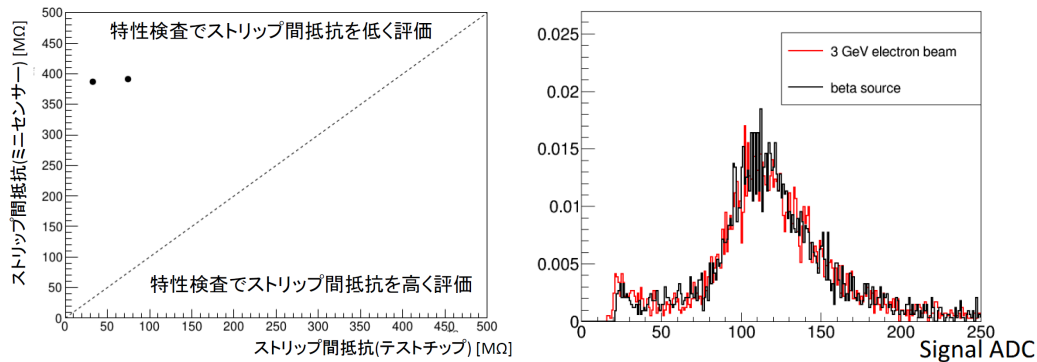


図 14: 量産時検査に追加して、さらに詳細なストリップセンサーの特性評価を行った結果。(左) ミニセンサーで測定したストリップ間抵抗。(右) 3 GeV 電子ビームを用いて得られた電荷収集量分布 (赤のヒストグラム)。黒のヒストグラムは、ストロンチウム 90 による β 線の照射で得られた分布である。

軸) は、量産時検査にて得た結果である。テストチップとミニセンサー両方を同じウェハーから得られたものを使うことはできなかったため、ここでは同じバッチから得たセンサー特性は同様の傾向を示すと想定し、同じバッチ (ウェハー約 40 枚分) に含まれるテストチップおよびミニセンサーを選ぶことにした。また、ミニセンサーのストリップ長は 1 cm であるため、それをテスト構造と同じストリップ長 (2.4 cm) に換算している。図 14(左) は、量産時検査で測定した結果よりも実際のミニセンサーで測定した結果の方が十分に抵抗値が高く、概ね 400 M Ω 程度であることを示している。量産時検査の観点では、テストチップを用いた結果の方がより低い値になるため、合格と判断したセンサーについては特性に問題ないということが言える。⁴

3 GeV 電子ビームでの電荷収集量の評価は、KEK 測定器開発テストビームラインにおいて実施した。ビーム上流の 4 個のシンチレーションカウンタをトリガーとし、Aliava DAQ システムを用いて信号電荷量を測定した。その結果得られた電荷収集量分布は図 14(右) のようになった。 β 線を用いて得られた分布とよく一致していることがわかる。これは、 β 線を用いた測定の際、センサー直下に設置したトリガーカウンタへの閾値を高く設定しているため、センサーを貫通した上で十分なエネルギーをトリガーカウンタに落とした高エネルギーな β 線のみを測定に用いており、そこから得られた電荷収集量もほぼ最小電離粒子に対するものとなっていたのだと思われる。したがって、量産時検査で測定した電荷収集量は、最小電離粒子に対する応答と考えてよいと結論付けられた。

(2) シリコンピクセル検出器の量産

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

⁴ストリップ間抵抗が低いため不合格となった場合は、不正確な測定に基づく判定であった可能性があるが、実際にそのような理由で不合格になったセンサーは量産時に発生しなかった。

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、筑波大学を含む 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。2024 年度には、前年度に行った試験量産の結果を受けて量産開始が承認され、いよいよモジュール量産の開始に至った。

以下では、日本グループによる ITk ピクセル検出器製作プロジェクトの中で、特に筑波大学グループが大きく貢献した開発や解析について述べる。

ピクセルセンサーの品質検査は製造元の浜松ホトニクスが行っているが、放射線損傷を受けた後の特性評価については、我々で実施する必要がある。日本グループでは、半年に一度のペースで数枚のピクセルセンサー⁵を選び、それに対して 70 MeV 陽子線を最大 $6.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射し、その時の漏れ電流を評価する。2025 年 1 月に実施した照射試験の結果を図 15(左)に示すが、要求値 (-25°C 、 -600 V において $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ダイオードで $11.25 \mu\text{A}$ 、 $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ダイオードで $22.5 \mu\text{A}$) を十分に満たす結果を確認できた。また、フレキシブル基板に対しては、形状や厚み、電圧印加時の電流値とその安定性などを確認する。様々な評価を行うが、その中でもフレキシブル基板内側の導電用銅箔の厚みの測定結果を図 15(右)に示した。試験量産時には全体的に銅箔の厚みが不足していたが、その結果を製造元にフィードバックしたことで、量産時にはよく改善されたことがわかった。なお、これらのセンサーおよびフレキシブル基板の品質検査手順は、2021 年度ごろから筑波大学の大学院生が中心となって開発および確立してきたもので、一連の努力によりいよいよ量産時のスループットに耐えうる信頼性や安定性のシステムとなったのである。

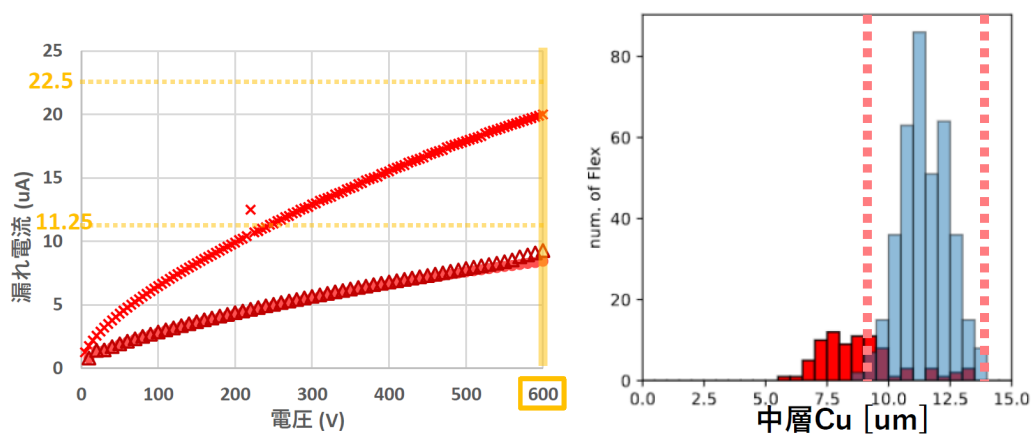


図 15: センサーおよびフレキシブル基板に対する品質試験結果の例。(左) $6.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射後の電流電圧特性。×が $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ダイオード、△と●が $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ダイオードの結果に対応する。(右) 中間層銅箔の厚み測定結果。赤は試験量産品、青は量産品の測定結果で、点線の範囲が合格基準である。

モジュール製作は、ハヤシレピック館山工場で行われる (図 16)。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。2024 年秋の量産開始当初は、1 日あたり 3 モジュールの製作を

⁵正確には、ピクセルセンサーと同じウェハー上に形成された小型ダイオード

行っていたが、それを最終的に7モジュールにまで増やす必要がある。この作業に複数大学・研究機関（大学院生を含む）の多くのシフターが概ね週単位で交代であたるため、細心の注意を払いながら作業をしなければ、モジュール破損事故は容易に起きうるし、確実に検査を進めるには莫大な数のシフターが必要となり、たちまち量産ラインが破綻してしまう。1日7モジュール製作というスループットに対応するため、量産初期の約半年間に、検査システムの細かいデバッグや測定及び解析の自動化による省力化（同時に作業する必要のあるシフター数の削減）、さらにはマニュアルやシフター同士の情報共有ツールの整備など、ハード面だけでなくソフト面も含めてシステム改善を続けてきた。これにより、館山工場現地で作業に当たる「現地シフター」3名に加え、各自の大学・研究機関からリモートでシステムに接続してソフトウェア操作や解析作業を行う「リモートシフタ」5名の体制で、1日5モジュールの製作を安定して行えるようになった。しかしまだ、1日当たり8名のシフターを配備して、1日5モジュールの検査をやっと捌ける状況となっていた。2025年度には、さらなる自動化や省力化、システムの信頼性向上を進め、1日7モジュール製作をシフター5名体制で継続する予定である。日本グループは、世界各地のモジュール量産サイトの中でも量産状況が先行しており、そこから得られた知見はITkプロジェクト全体にとって重要なものとなっている。



図 16: 量産開始時点でのハヤシレピック館山工場内 ITk ピクセルモジュール検査システムの様子。現在は、冷却ボックスを7台に、メトロロジーマシンを2台に増強し、1日最大7モジュールでの製作に備えてある。

(3) ITk ピクセル検出器構造体の製作

製作されたピクセルモジュールは、次にカーボン製の「ローカルサポート」に搭載される。2023年度に日本グループが試験量産したモジュールは、CERN 研究所において2025年3月に最初のローカルサポートに搭載された。この時には、筑波大学からも2名（廣瀬、菅原）がCERN 研究所に出向き、搭載作業に参加した。図17(左)に示すように、最初のモジュール搭載済みローカルサポート（loaded local support; LLS）には、全体の半分の部分に相当する18台のモジュールが搭載された。次に、このLLSに対して100回のサーマルサイクル

(-45°C から $+40^{\circ}\text{C}$ の熱変化)を実施した。これは、実際の実験環境で ITk 検出器が受け得る熱ストレスを、一定の安全ファクターを加えて再現するものである。試作版 ITk 用ピクセルモジュール (RD53A) で行った LLS サーマルサイクルではモジュール特性の悪化が見られ、また ITk ストリップ検出器では LLS サーマルサイクルでセンサーの破損が頻発するなど、深刻な問題が露見しうる重要なステップであった。例えば、あり得る問題の 1 つがサーマルサイクルとともにバンプ接合が剥がれてしまうということであったが、クロストークを使った評価 (図 17(右)) では、特にバンプ剥がれは見られなかった。このほか、電流電圧特性やノイズ特性など、様々な測定結果において特性の悪化は見られず、まずは大きなステップをクリアしたこととなる。これらの LLS 搭載後モジュールの電氣的試験結果をまとめて解析するためのツールは廣瀬が開発し、現在は他の LLS 製作サイト (ジュネーブ大学やボン大学など) でも使用されている。

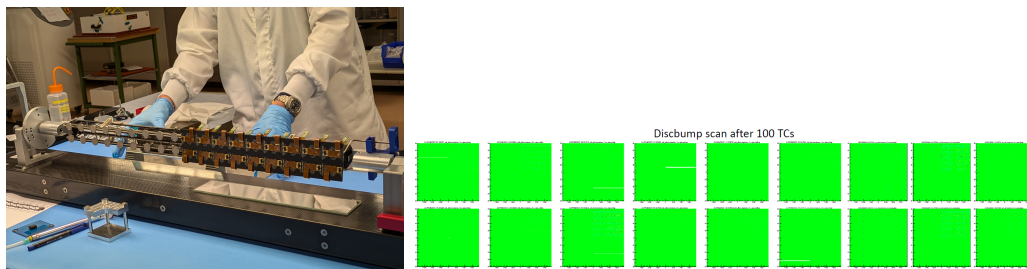


図 17: 日本で製作された試験量産モジュールを使用した LLS の様子。(左) LLS の写真。18 台のモジュールが搭載されていることがわかる。(右) 100 回のサーマルサイクルが完了した後のクロストークスキャン結果。ほぼ全面的に 100% の応答が見えており (黄緑部分)、バンプ剥がれの様子は見られない。

【4】 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、現在のところ単電荷の荷電粒子を検出することは難しい。現状では素粒子検出器として技術的な課題はあるものの、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、ウェハー品質も劇的に向上しているため、LHC を超えるハドロンコライダーにむけ、50 年後を見据えた基礎技術開発を開始しておくことには意義がある。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。

2024 年度には、GaN ピクセル検出器サンプルの性能評価を開始した。このサンプルは、有感層厚さ $10\text{ }\mu\text{m}$ を持ち、 n 型バルク (不純物としてシリコン原子を 10^{16} cm^{-3} 程度含む) の表面に p 型電極 (マグネシウム原子を 10^{18} cm^{-3} 程度含む) を形成しており、 pn 接合部に逆バイアスを印加することで空乏層が形成される。性能評価の手始めとして、アメリカウム 137 からの α 線 (エネルギー 5.4 MeV) および HIMAC における $170\text{ MeV}/n\text{ Xe}$ ビームの照射を行い、それぞれの原子核に対する電荷特性を測定した。図 18 には、電荷収集量をバイアス電圧を変えながら測定した結果を示した。ここでは、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚の n 型バルク層内で 5.4 MeV の α 線もしくは $170\text{ MeV}/n$ の Xe 原子核が落とすエネルギーを Geant シミュレー

ションで見積もり、そこから予想される全生成電荷量に対する検出された電荷量を求めた。この結果から、どちらの場合も概ね50%の電荷を収集できていることがわかる。逆バイアス電圧が200 V のとき、空乏層厚は約5 μm と推定されることから、電荷収集量は概ね空乏化の度合いに一致していると言える。

さらに、内部増幅機構を持った GaN 検出器 (GaN LGAD) の開発も開始した。基本的な構造は GaN ピクセル検出器と同様だが、 p 型電極の直下に不純物濃度の高い n 型半導体層があり、ここで電場が強められることからアバランシェ増幅が起きると期待される。内部増幅により電荷量を増やすことで、電子のような単電荷粒子 (素粒子) の信号の検出を狙う。さらに、GaN は速い応答速度を持つため、時間分解能の良い検出器を製作できる可能性もある。 α 線での信号検出には成功しており、今後詳細に特性を理解しつつ、まずはアバランシェ増幅を観測することが目標である。

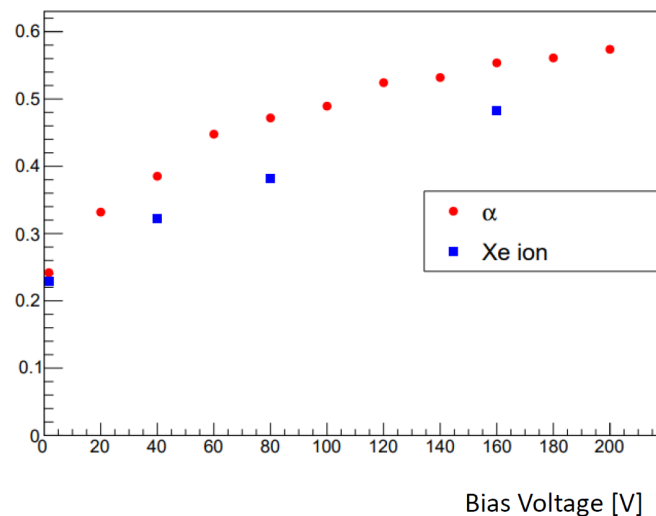


図 18: GaN ピクセル検出器サンプルに 5.4 MeV α 線もしくは 170 MeV/ n Xe ビームを照射して得られた電荷収集量。縦軸は、10 μm 厚の有感層内で生成されると期待される電荷量 (Geant シミュレーションによる見積もり) で規格化してある。

【5】 放射線耐性を備えたモノリシック型ピクセル検出器の開発

次世代高エネルギー加速器実験においては、ヒッグス粒子の精密測定を主目的とするヒッグスファクトリー型実験が最有力候補とされている。これらの実験では、電子・陽電子衝突型加速器が想定されており、ハドロン衝突型加速器と比較して背景事象やパイルアップが極めて少ない。このようなクリーンな実験環境においては、飛跡再構成の精度が大きく向上する一方、飛跡検出器自体の物質量が性能に与える影響が無視できない課題として浮上する。この課題に対する有効な解決策の一つが、センサーと読み出し回路を同一基板上に集積したモノリシック型検出器である。従来のハイブリッド型検出器と異なり、モノリシック型は製造工程が大幅に簡略化されるため、製造コストおよび製造期間の両面で優位性を持つ。また、全体としての物質量が削減可能である。さらに、モノリシック型検出器が高い放射線耐性を有する場合、放射線環境が極めて過酷な高輝度ハドロン衝突実験においても実用的な選択肢となる。とくに、検出器の複数回の交換が前提となるような運用条件下では、コスト・性能・作業負荷の観点から極めて有利である。

本研究では、欧州原子核研究機構（CERN）の研究グループと連携し、図 19(a) に示すような放射線耐性を備えたモノリシック型検出器 MALTA2 の開発を進めている。MALTA2 は、高輝度 LHC 実験の最外層ピクセル検出器としての利用を想定して開発されており、1 MeV 中性子換算で $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ に達する放射線耐性を有する。ピクセルサイズは $36.5 \mu\text{m}$ 角で、 224×512 ピクセル ($9 \times 18 \text{ mm}^2$) のアレイ構造を持つ (19(b))。各ピクセルには電荷感応増幅器、比較器、およびデジタル回路が実装されており、高密度かつ高速な信号処理が可能である。

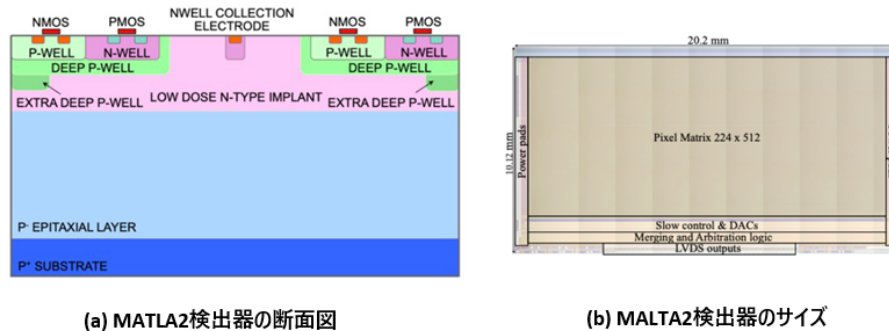


図 19: (a) は、MALTA2 検出器の断面を示し、中央の n 型電極から電荷を読み出す。電極間の領域には p 型の WELL が配置され、電荷感応増幅器や比較器が実装されている。n 型電極が小さいことが原因での検出効率低下を改善するため、低いドーパ量の n 型層が全体に配置されている (図のピンク色の領域)。(b) は MALTA2 検出器のサイズで、約 $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ の有感領域を持つ。

2023 年には、米国フェルミ国立加速器研究所（Fermilab）および高エネルギー加速器研究機構（KEK）の測定器開発用ビームラインにおいて、MALTA2 検出器の性能評価を実施した。その際、標準的な逆バイアス電圧下における検出効率は約 90%と低く、閾値依存性等の詳細な測定を行ったが、原因の特定に至らなかった。2024 年度に再度、KEK 測定器開発ビームラインにおいて、別の MALTA2 チップを用いたビーム試験を実施した。その結果、図 20 に示すように、検出器全体において位置依存性のない 98.6%の高い検出効率を得られた。これにより、システム全体としての信号処理性能および検出器の空間一様性が要求性能を満たしていることが確認された。2023 年度に観測された効率低下については、試験に用いたチップの一部において CMOS 回路に不具合が存在していた可能性が高いと考えられる。今後は、回路不良の箇所を特定するとともに、歩留まりの向上を目的とした設計改良を進める予定である。あわせて、MALTA2 検出器の放射線耐性についても、陽子照射による耐性評価を継続的に実施していく予定である。

この研究は、欧州原子核研究所や高エネルギー加速器研究機構との共同研究で推進している。

【6】 ATLAS ITk pixel 検出器を用いたビームテレスコープの開発

近年、加速器実験の高輝度化および高エネルギー化に伴い、高密度ピクセル構造および高い時間分解能を兼ね備えた飛跡検出器の開発が急務となっている。これに応じて、第 (2) 章、第【7】章、第【5】章で述べたような検出器の開発においては、高エネルギー粒子を用いたテストビーム実験による性能評価や、放射線損傷後の特性評価を行う照射試験が不可欠である。特に、検出効率の位置依存性や時間分解能を高精度で評価するためには、高性能なビーム・テレスコープシステムが必要である。

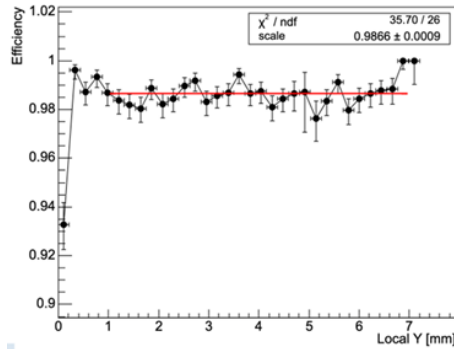


図 20: MALTA2 検出器の検出効率の位置依存性。赤線は検出器の有感領域を定数でフィットしたもので 98.6% の検出効率を得られた。また、有意な位置依存性は見られず、検出器応答が一表であることが確認された。

本研究では、新型検出器の開発支援を目的として、大面積かつ高速なビーム・テレスコープシステムの構築を行った。テレスコープには、ATLAS 実験のアップグレード用に開発された ITkPix フロントエンド・チップを搭載したモジュールを用いた。ITkPix Quad モジュールは、50 μm 角のピクセルピッチを持ち、400×394 ピクセルのアレイ構造を持つ ITkPix チップ 4 枚を接続することで約 40 mm 角の有効面積を実現する。これを 3 枚 1 組としたトリプレットを 2 組製作し、試験対象 (Device Under Test: DUT) を中央に挟む構成でテレスコープを形成した。ITkPix モジュールは最大 1 MHz のトリガーレートに対応可能であり、高い位置分解能と大強度ビームへの適応性を兼ね備えている。

このような高性能を有するビーム・テレスコープは世界的にも例が少なく、本研究で開発したシステムは将来の粒子検出器開発に資する独自性の高い装置である。また、様々なビームラインでの利用を見据え、可搬性の高いシステム構築を目指した。

本システムの構成要素として、モジュール読み出し用基板、冷却機能を備えたクーリングボックス、メカニカルサポート構造を設計・製造した。これらを用いて、フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) および高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の測定器開発ビームラインにおいて試験を実施し、3 層のテレスコープによるデータ取得に成功した。あわせて、Trigger ロジックを制御する FPGA ユニットの開発も行い、システムとしての完成に至った。

一方、初期試験においてはクーリングボックスの冷却能力、および DAQ システムの同期に関していくつかの問題が確認されたため、現在その改善を進めている。また、今後の小型 R&D センサー評価に対応するため、検出器の特定領域 (Region-of-interest) のみでトリガーを発行するセルフトリガー機能付き基板も開発した。KEK ビームラインを用いた評価試験を通じて、セルフトリガー機能が正常に動作することを確認し、既に実運用が可能な状態にある。

本研究は、日米協力科学事業の枠組みに基づき、高エネルギー加速器研究機構 (代表: 中村浩二助教、宇宙史研究センター連携教員)、大阪大学、米国ローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) との共同により推進されている。

【7】 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。半導体検出器の優れた位置分解能に加え、優れた時間情報をあわせもつ LGAD は、こうした実験環境で有効な検出器となると期待できる。将来の高放射線の加速器環境に耐えるためには、読み出し回路の開発と放射線耐性の強化が必要であり、現在これら課題に取り組んでいる。

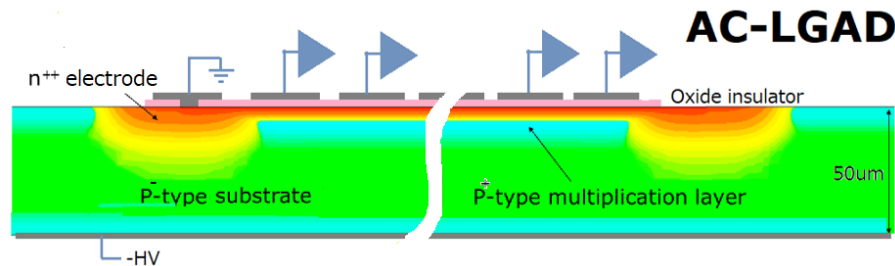


図 21: AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

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 μm 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 ps 程度を達成している。

将来の加速器実験で用いるには、高い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 V を越えてしまう問題がある。目標は、 $10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 程度の照射量まで作動することである。この p^+ 不純物の密度低下は、アクセプタとしてドーピングしているホウ素が、放射線の照射により格子から外れ非活性化しアクセプタとして働かなくなることが原因であると考えられる。不活性化ホウ素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で、実効的なアクセプタ濃度はさらに低下する。

2023 年度には、浜松ホトニクスと協力し部分活性ホウ素法（熱処理によりホウ素を活性化したあとで、同量または半分の量の不活性ホウ素を注入する。これらを p^+ 層に存在する酸素とはじめから結合させておくことにより、放射線が照射されても新たに酸化ホウ素 BO が増加することを防ぐ）により LGAD サンプルを試作、東北大学先端量子ビーム科学研究センターにて陽子線を照射し、放射線耐性を評価した。もっともよい時間分解能が得られた印加電圧を運転電圧とすると、運転電圧の上昇幅を図 22 に示す。放射線照射後の運転電圧を引き下げられる結果をえることができなかった。

2023 年度の研究で部分活性ホウ素法により放射線耐性の向上が見られなかった原因として、ウェハ内に不活性ホウ素より多い酸素が存在していたことが考えられた。そこで 2024 年度には、酸素を除去した環境下で新しく不活性ホウ素法による LGAD サンプルを作成し、照射試験を行った。得られた運転電圧の上昇幅を図 23 に示す。酸素を除去した環境下で製作しても、部分活性ホウ素法による改善は確認できなかった。

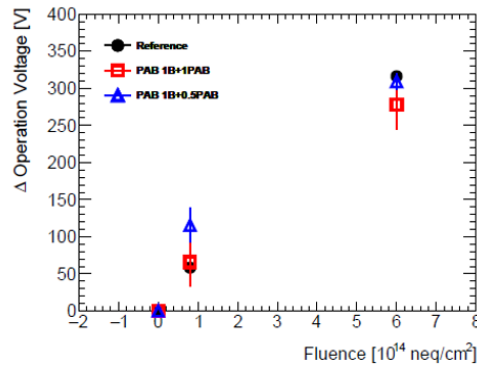


図 22: 部分活性ホウ素法による放射線耐性向上の試み。運転電圧の上昇幅の照射量依存性。黒丸は部分活性ホウ素法でない通常のサンプル。四角（三角）はそれぞれ、活性化ホウ素と同量（半分の量）の不活性ホウ素を注入した部分活性ホウ素法サンプル。

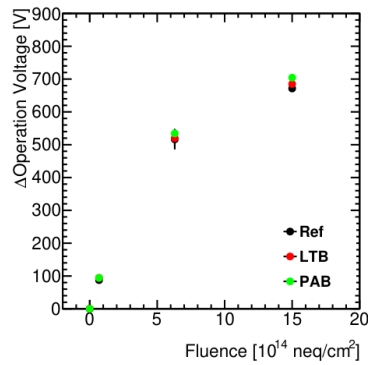


図 23: 酸素を除去した環境下での部分活性ホウ素法による放射線耐性向上の試み。運転電圧の上昇幅の照射量依存性。黒は部分活性ホウ素法でない通常のサンプル。緑（赤）は、酸素を除去した環境下で活性化ホウ素法（通常の方法）で製作したサンプル。

海外では、増幅層に炭素を注入する研究が進んでおり、放射線耐性の向上が確認された研究成果も報告されている。今後は、炭素注入による放射線耐性の向上をわれわれのグループでも確認し、他の改善策を併用しながらさらなる改良の可能性を探る。

加速器実験の飛跡検出器として使用する場合、空間的な制約があるため読み出しエレクトロニクスはコンパクトに設計する必要がある。読み出しチャンネル数が多大になるため、チャンネル当たりの消費電力も最小に抑える必要がある。さらに、高時間分解能検出器の特性を生かすためには、読み出しエレクトロニクスには高速処理も必要となる。これまで、われわれは Mini-Circuits 社製 GALI S66 + アンプを使用して LGAD の性能評価を行ってきた。2024 年度からは、集積回路（ASIC）による読み出し回路の開発、性能評価を開始した。

シリコンゲルマニウム（Si-Ge）を用いたヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）では、増幅率を維持したまま動作速度を向上できる。AC-LGAD 検出器に波長 1064 nm の赤外レーザーを強度を変えながら入射し、ワイヤーボンドを介してジュネーブ大学で開発した Si-Ge HBT の ASIC で読みだした結果を図 24 に示す。MIP 相当の信号に対してのジッターは、8.4 ps と測定できた。LGAD 検出器と ASIC を異方導電性フィルム（ACF）を用いてフリップチップしたサンプルも製作済みで、今後性能評価を行う。

一方、集積回路の開発では、CMOS を用いた ASIC が主流である。CMOS による ASIC

開発も行い、時間分解能や消費電力について、HBTと比較しながら最適な ASIC プロセスを研究する。

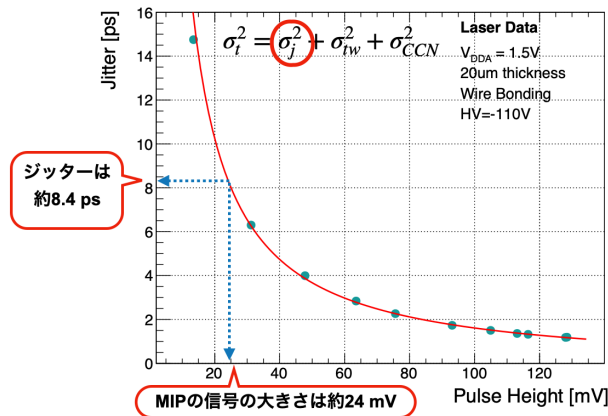


図 24: 赤外レーザーを入射し、Si-Ge HBT を用いた ASIC で読み出したときの AC-LGAD の波高とジッターの測定結果。

放射線耐性と読み出しエレクトロにクス以外の観点では、ビームとベータ線を用いた測定結果を解析し、粒子の種類（陽子と電子）やエネルギーに対する LGAD 検出器の時間分解能に対して理解を深めた。シミュレーション研究により、粒子がセンサー内に落とすエネルギーの深さ方向の揺らぎ、電子・ホール対の電荷が増幅され電極に収集される過程が時間分解能にどのように寄与するかについても理解を深めた。

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、BNL 研究所、UCSC 大学と連携しながら開発研究を推進してきた。

【8】 COBAND 実験

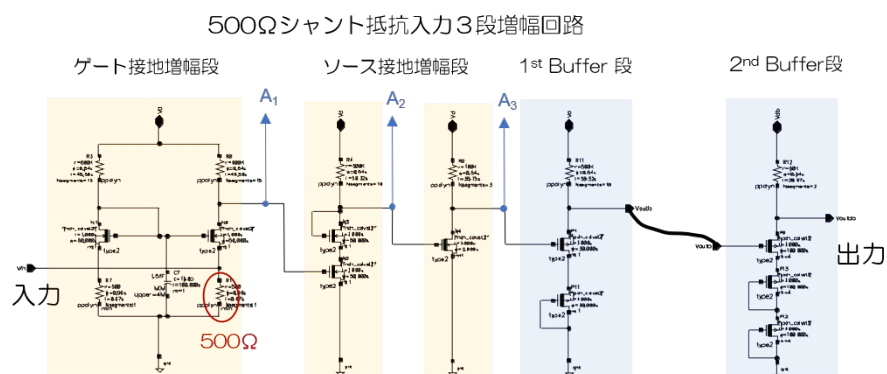


図 25: 低いインピーダンスを持つ STJ の信号入力に対応し、500 Ω シャント抵抗を入力にもつ信号増幅器の回路図。増幅段として、初段にゲート接地、後段にソース接地増幅回路を持つ。各増幅段の出力をモニターするための端子 (A_1 , A_2 , A_3) を有する評価用回路。

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 $\Delta = 1.55$ meV, $T_c = 9.23$ K) を超伝導体、アルミニウム ($\Delta = 0.172$ meV, $T_c = 1.20$ 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 ($\Delta = 20$ μ eV, $T_c = 0.165$ 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に設置された超伝導素子 STJ 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 程度と小さく、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 μ 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 と大きく、半導体素子等と比較すると低いインピーダンスを持つ。これらの背景から、STJ 信号の読み出しは、最適化した設計が必要であり、超伝導素子の潜在性を最大限に引き出すための決定的な要素となる。

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 2 種類設計し、SOI ウェハ相乗り製造プロセスに参加して試作した。

2024 年度の活動として、試作した増幅器回路のうち 500 Ω のシャント抵抗を入力としゲート接地段を初段に持つ 3 段増幅の電圧変換増幅器 (図 25) の詳細な評価を中心におこなった。この増幅器については、2022 年度に評価をおこない、初段・2 段目は動作しているが、3 段目の増幅率が低くなっていることが判明していたが、その原因について理解するために、より詳細なデータ収集が必要であった。この増幅器回路には、各増幅段の出力をモニターするための端子がある。そこから前段出力信号の直流オフセットをモニターしたり、後段入力に直流オフセットを印加することが可能である。この仕組みを使用し、調査した結果、2 段目出力信号の直流オフセットが設計と大きく異なっており、3 段目の FET が飽和領域で動作していないことが判明した。また、3 段目入力信号に適切な直流オフセットを印加することによって、3 段目増幅段も正しく動作することが確認できた。これらの知見を得て、今後回路設計の見直しを行う。

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

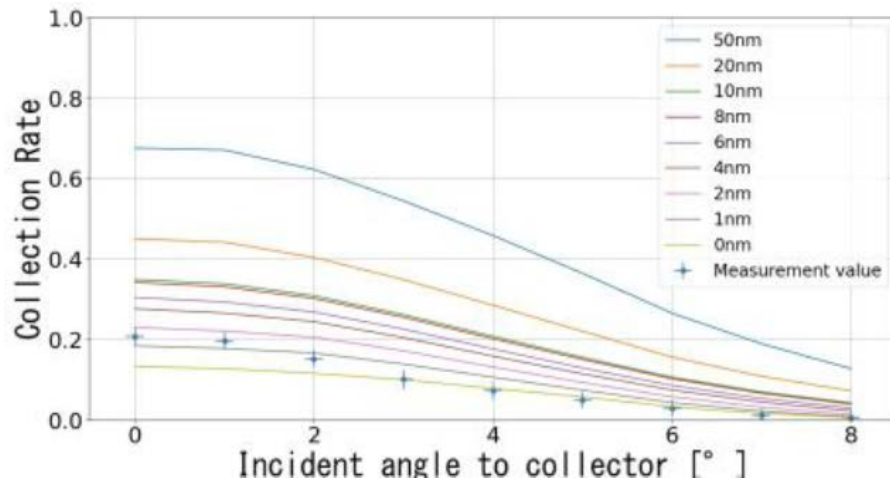


図 26: 波長 $9.6\ \mu\text{m}$ 平行光に対する円錐型ホーン集光器の集光率の光線入射角依存性測定結果。曲線はホーン壁面のアルミニウム蒸着膜厚を仮定したシミュレーションを示している。結果は、アルミ蒸着厚が $1\sim 2\ \text{nm}$ 程度であることを示唆している。

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 $50\ \mu\text{m}$ 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。

集光器は、超短パルスレーザーアブレーションによる微細加工技術を用いて、 $2\ \text{mm}$ 厚石英基板に入射口 $400\ \mu\text{s}$ 、射出口 $60\ \mu\text{s}$ の円錐型ホーン形状の集光ホーンを形成し、側面に $100\ \text{nm}$ 厚を目指しアルミ蒸着を行うことで、試作された。

2024 年度における成果としては、前年度に続き、集光器の集光率を測定した。前年度の測定の評価では、ホーン壁面のアルミ蒸着の厚みが十分ではないことが示唆されたが、今年度はより詳細な評価を行った。図 26 は、波長 $9.6\ \mu\text{m}$ 平行光に対する円錐型ホーン集光器の集光率の光線入射角依存性測定結果を示している。ホーン壁面のアルミ蒸着厚を仮定し、その場合の壁面への反射率を壁面への入射角も考慮して、光線追跡シミュレーションを行い、予想される集光率の光線入射角依存性を示している。これらのシミュレーション予想との比較により、結果は、アルミ蒸着厚が $1\sim 2\ \text{nm}$ 程度であることを示唆している。この評価は、可視光～近赤外光でも行っており、同様のアルミ蒸着厚の評価結果を得ている。目標としている波長 $50\ \mu\text{m}$ 域では、集光率はほぼ 0 と予想され、波長 $57.2\ \mu\text{m}$ での実測では集光器を透過してきた光が観測出来なかった測定結果とも矛盾しない。波長 $50\ \mu\text{m}$ 域で、十分な集光率を達成するには、アルミ蒸着厚は、 $500\ \text{nm}$ 以上にする必要がある。

今後は、現状の光線追跡シミュレーション手法に加え、波動解析シミュレーションも加え、シミュレーション確度を高めるのと同時に、アルミ蒸着方法を化学気相成長法 (CVD) に変更することを計画している。

【9】 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}Ca , ^{96}Zr , ^{160}Gd 等、十数種類の特定の原子核のみで観測可能であるが、崩壊の半減期予測においては核種による不定性が大きいので、 $2\nu\beta\beta$ の半減期測定を行うことで理論予想の精度を向上させることも重要である。

我々は、 $\text{Ce:Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (以下、GAGG) という無機シンチレータを用いて、 ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索実験 (PIKACHU 実験) を計画している。 ^{160}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}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。PIKACHU 実験ではこの二点を解決して、最高感度での ^{160}Gd 二重ベータ崩壊探索、特に未発見の $2\nu\beta\beta$ 発見を目指している。

(1) 高純度 GAGG 結晶の大型化

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 年にその第一段となる結晶 (Cr#1) を完成させた。これは結晶原料のうち Gd_2O_3 , Al_2O_3 に対して、高純度なものを検討した結果である。内部不純物起源のアルファ線から、不純物量を見積もったところ従来結晶と比べて約一桁の純化が確認されており、先行研究と同等のバックグラウンドレベルであることが分かった。ただしこの Cr#1 は重量 783 g と小さいため、感度の更新には大型化が必須である。そこで 2024 年は、この高純度 GAGG 結晶を大型化し、神岡地下実験室での長期測定を開始することを目指した。

現在の GAGG 結晶の純度は、原料のそれと比較して悪いことが明らかになっている。結晶育成に用いているチョクラルスキー炉内のジルコニア断熱材の含む U/Th 不純物量が高いことが、Ge 検出器による測定で分かっており、上部断熱材のろつぼへの混入が原因と見ている。そこで今年度の高純度結晶の大型化では、高純度原料を用いて以下の 2 本の大型結晶育成に取り組んだ。

- 上部に配しているジルコニア断熱材の穴を広げるつぼへの混入を防いで育成 (Cr#3)
- 上部に配しているジルコニア断熱材を、純度の高いアルミナ断熱材に変更し育成 (Cr#4)

まず Cr#3 の GAGG 結晶だが、こちらは昨年末から準備を進め、結晶は 2024 年 5 月に完成した。結晶重量は 1469 g であり、Cr#1 と比べると 2 倍程度の大型化に成功した。しかし結晶育成途中に炉内の水漏れなどのトラブルが発生し 3 度の作り直しを余儀なくされた。

加えて、上部断熱材の形状を変更したことによる、炉内の温度パラメータの変化が影響し、残念ながら完成品には大きなクラックが入ってしまった。また発光量も Cr#1 と比較して半分程度と結晶性能にも悪影響があった。

次に Cr#4 の GAGG 結晶は、上部の断熱材のみアルミナに変更したセットアップで 10 月に完成した。図 27 左は、結晶 Cr#4 にブラックライトを照射している写真である。結晶の発光量は Cr#1 と同程度を達成し、結晶の重量は 2436 g と Cr#1 の 3.1 倍の大型化を実現した。

この二本の結晶に対し、筑波大学に設置してある鉛シールド内でアルファ線バックグラウンドの測定を行った。得られたアルファ線スペクトルを従来結晶（4N）、小型高純度 GAGG（Cr#1）と比較したものを図 27 右に示す。全ての高純度結晶で、青の従来結晶よりも高い純度を達成していることが見て取れる。一方で、どちらの結晶も赤の Cr#1 の純度には到達しておらず、アルファ線量は Cr#1 と比べると Cr#3 で 4.3 倍、Cr#4 で 2.2 倍程であった。今後、高純度化を阻んでいる原因を解明し、Cr#1 と同程度の純度で、かつ大型の結晶の育成に取り組んでいく予定である。

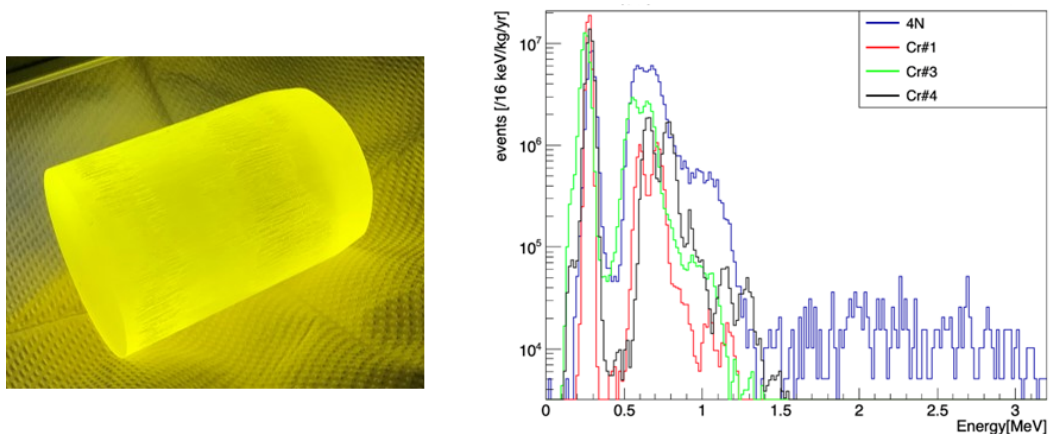


図 27: (左) PIKACHU 実験で開発している高純度 GAGG 結晶 (Cr#4) の写真。(右) 4 種類の結晶に対してのバックグラウンド測定で得られたアルファ線エネルギースペクトル。

(2) 神岡地下実験室での長期データ測定 (Phase 1) 開始

育成した 2 本の高純度結晶 (Cr#1 および Cr#4) を用いて、二重ベータ崩壊探索のための PIKACHU Phase 1 実験を開始した。地下 1000m にある東北大学茂住実験室に設置した鉛と銅の放射線シールド内に、Cr#1, Cr#4 の二本の結晶と光電子増倍管、ライトガイドを組み合わせた検出器モジュールを設置した。図 28 左は 2024 年 12 月に行った実験立ち上げ作業の様子である。

シールドは周囲の岩盤などから来る環境放射線を防ぐことを目的としているが、空気中のラドン (^{222}Rn) は希ガスであるためシールド内に容易に入り込んでしまう。そこで、我々はシールド内に窒素ガスを 0.9 l/min で流すことでラドンを除去した。図 28 右は、窒素を流す前後でのエネルギースペクトルの比較である。窒素流入前の黒いヒストグラムには ^{222}Rn 下流の ^{214}Bi が出すガンマ線のピークが多く確認できるが、窒素を流すことによりそのピークが大きく減少していることが見て取れる。

Phase 1 実験は 2024 年 12 月 10 日に開始した。以降、つくばからの遠隔操作によりデータ取得を継続しており、2025 年 3 月 31 日時点で約 106 日分のデータが蓄積されており、現在もデータ収集を継続中である。

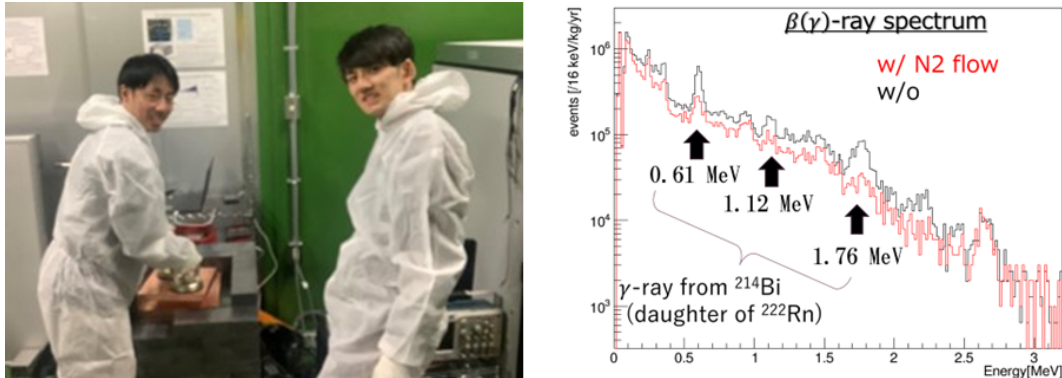


図 28: (左) 神岡の地下実験室内の鉛シールドでの Phase 1 実験立ち上げの様子。(右) シールド内を窒素ガスパージする前後のエネルギースペクトル。窒素導入後は ^{222}Rn 起源のバックグラウンドが現象した。

(3) ^{40}K バックグラウンド事象の見積もり

^{40}K は環境中に存在する放射性同位体で、1.46 MeV のガンマ線を放出する。主に光電子増倍管 (PMT) のガラス管部分に含まれており、ガンマ線が GAGG 結晶にエネルギーを落とし二重ベータ崩壊 (主に $2\nu\beta\beta$) 探索の際のバックグラウンドとなる (図??左)。通常、PMT のガラスはホウケイ酸硝子という、主成分の SiO_2 に加えいくつかの原料を混ぜて作られるガラスである。酸化カリウム (K_2O)、炭酸カリウム (K_2CO_3) などの副成分に含まれる ^{40}K が主要なバックグラウンド源であるガンマ線を生み出している。

そこで、GEANT4 シミュレーションと実験データの比較によって PMT 由来の ^{40}K を見積もった。シミュレーションでは神岡測定の設定アップを再現し、ガラスと光電面にすべての ^{40}K が集まっていると仮定しシミュレーションを行った (図 29 右)。シミュレーションで得られた結果と神岡測定によって見積もられた外部由来 ^{40}K のバックグラウンド量について、1.46 MeV のガンマ線事象数を比較したところ、外部由来の ^{40}K の約 6 割が PMT 起源であることが判明した。副原料にカリウムを含まない無アルカリガラスを用いた PMT も販売されており、導入を検討することとなった。また、PMT 以外のバックグラウンド源としてライトガイド、GAGG 結晶を覆う反射材や遮光用のブラックテープ、シールド材の内側に ^{40}K を含む汚れが付着している等が予想され、今後、原因を究明し低減を目指していく。

(4) GAGG 結晶のさらなる高純度化に向けた R&D

さらに感度を高め $2\nu\beta\beta$ の発見を実現するには、現状に加えてさらに一桁の高純度化が求められる。これまでの調査から、結晶の ^{238}U 濃度 (125 mBq/kg) は、原料の純度 (<16 mBq/kg) よりも高く、育成時の混入が疑われている。結晶育成炉を見直したところ、ジルコニア (ZrO_2) 断熱材 (図 30 右) が原料を比較して約 3 桁高い濃度の U 系列不純物含有

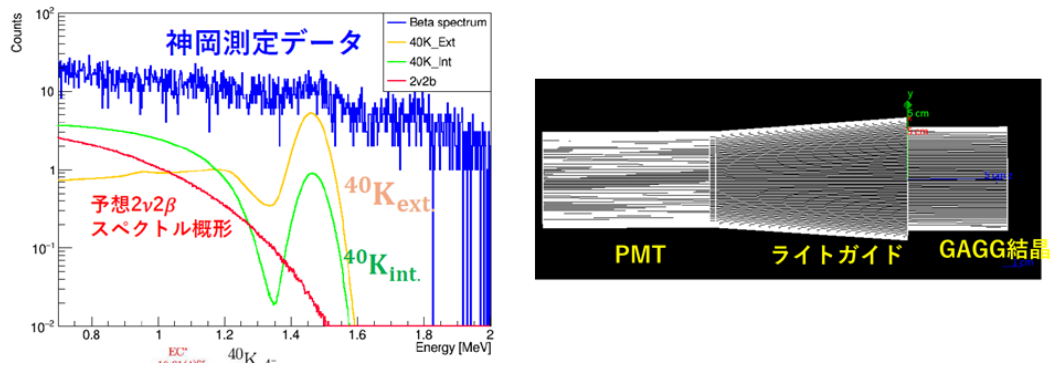


図 29: (左) 神岡地下実験室で測定したバックグラウンドデータから、PSD でベータ線を選び出したときのエネルギースペクトル (青)。 ^{160}Gd の $2\nu 2\beta$ スペクトル (赤)、GEANT4 シミュレーションによる結晶内部起源 ^{40}K ($^{40}\text{K}_{\text{int}}$ 、オレンジ)、外部起源 ^{40}K ($^{40}\text{K}_{\text{ext}}$ 、黄緑)。(右) GEANT4 で再現した実験セットアップのジオメトリ。シミュレーションでは、 ^{40}K を PMT の入射窓で発生させて GAGG 結晶内でのエネルギー損失を求めた。

していることが分かった。この結果から、上部に配した断熱材の破片が、結晶育成中に原料融液に混入したと仮説を立てた (図 30 左)。そして、上部断熱材の穴の大きさをるつぼサイズに広げて、断熱材の混入を防ぐセットアップで育成を進めた。先述の通り、このセットアップで育成した結晶 (Cr#3) は 5 月に完成した。しかし、セットアップの大幅な変更と、それに伴う育成条件 (加熱用高周波電流の値、結晶の引き上げ速度・回転速度、ガスの流入速度、等) の変更によりクラックが入ってしまった。断熱材の穴サイズを変える育成法は困難であることが判明したため、高純度な ZrO_2 原料を用いた断熱材作製を試みている。高純度 ZrO_2 断熱材の試作品が 2025 年 3 月に完成し、簡易の測定により ^{238}U 含有量が従来の断熱材より 3 ケタ程度低減したことが明らかになった。来年度は、この高純度断熱材を用いて結晶育成を進めていく予定である。

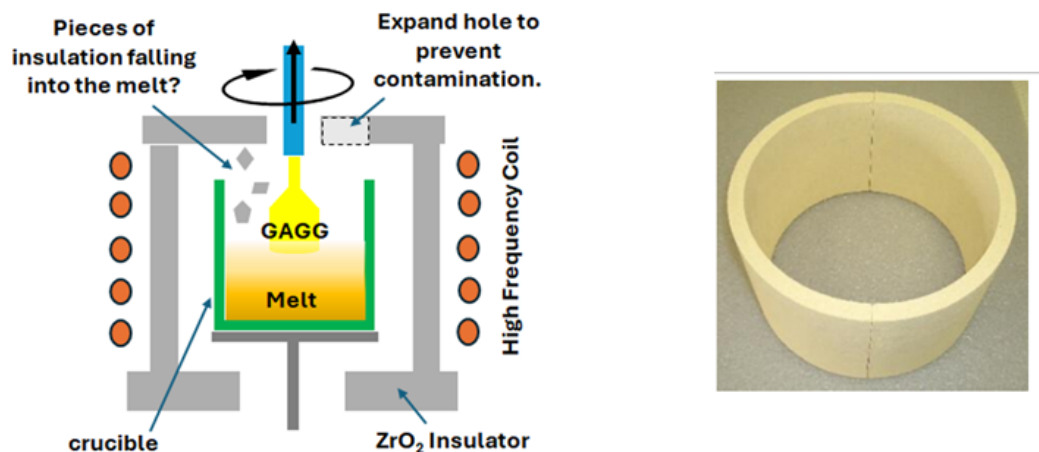


図 30: (左) チョクラスキー型の結晶育成炉概念図。上部断熱材の混入を防ぐために穴を拡大したが、結晶にクラックが入ったため諦め、断熱材そのものを純化することを目指している。(右) 炉内で用いているジルコニア断熱材の写真。不純物含有量が非常に多くバックグラウンドの原因と考えられている。

〈 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, 1,170 千円 (直接経費: 900 千円、間接経費: 270 千円) (2024 年度)
2. 科学研究費 国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化) 「ヒッグスが媒介する未知粒子発見に向けた最高探索感度の追求」, 2024-2025 年度, 研究代表者: 廣瀬茂輝, 13,000 千円 (直接経費: 10,000 千円、間接経費: 3,000 千円) (全期間)
3. 科学研究費 国際共同研究加速基金 (国際先導研究) 「力の統一的理解に向けたエネルギーフロンティアの次世代への展開と国際的人材育成」, 2024-2040 年度, 研究分担者: 廣瀬茂輝, 855 千円 (直接経費: 658 千円、間接経費: 197 千円) (2024 年)
4. 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, 6,370 千円 (直接経費: 4,900 千円、間接経費: 1,470 千円) (2024 年度)
5. 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, 2,860 千円 (直接経費: 2,200 千円、間接経費: 660 千円) (2024 年度)
6. 科学研究費 基盤研究 (A) 「遠心分離法による ^{48}Ca の濃縮」, 2024 - 2027 年度, 研究分担者: 飯田崇史, 260 千円 (直接経費: 200 千円、間接経費: 60 千円) (2024 年度分担金)
7. 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)
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. 科学研究費特別推進研究 「JSNS2 実験による J-PARC 物質生命科学研究施設ニュートリノ研究の発展と展開」 2020-2024 年度, 研究代表者: 丸山和純, 分担者: 武内勇司
300 千円 (2024 年度分担金)
10. 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イメージセンサー実証に向けた調査研究」, 2024 年度, 研究分担者: 廣瀬茂輝, 800 千円 (直接経費: 800 千円, 間接経費: 0 円)
11. 筑波大学 国際共同研究マッチング・シードファンド トップレベル国際ネットワーク構築支援プログラム 「世界最先端の高輝度加速器を用いた素粒子物理学の実験的研究」, 代表者: 受川史彦, 780 千円 (2024 年度)

12. 筑波大学 社会工学commons・データバンク プロジェクト「宇宙線ミュー粒子の地表計数率のモニタリング」, 代表者: 武内勇司, 130.6 千円 (2024 年度)

〈 受賞 〉

1. 廣瀬茂輝, 第3回 (2025 年) AAPPS-JPS Award, アジア太平洋物理学会連合・日本物理学会, 2024 年 12 月 26 日決定
2. 大森 匠, 日本物理学会学生優秀発表賞 (実験核物理領域), 第 79 回年次大会 (2024 年 9 月, 北海道大学)
3. 石上元直, 筑波大学理工学群物理学類 卒業研究発表会 ベストプレゼンテーション賞 (2025 年 2 月)

〈 国際会議の実施 〉

1. Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2024, Universe Evolution and Matter Origin, September 30, 2024, online.

〈 論文 〉

(査読論文)

1. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a light CP-odd Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **12**, 126 (2024)
2. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry using vector boson fusion signatures and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **12**, 116 (2024)
3. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy right-handed Majorana neutrinos in the decay of top quarks produced in proton-proton collisions at $s=13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **110**, 112004 (2024)
4. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Accuracy versus precision in boosted top tagging with the ATLAS detector,” JINST **19**, P08018 (2024)
5. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet radius dependence of dijet momentum balance and suppression in Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **110**, 054912 (2024)
6. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in association with a W boson in pp collisions at $s=13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **110**, 072010 (2024)

7. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Using pile-up collisions as an abundant source of low-energy hadronic physics processes in ATLAS and an extraction of the jet energy resolution,” *JHEP* **12**, 032 (2024)
8. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for neutral long-lived particles that decay into displaced jets in the ATLAS calorimeter in association with leptons or jets using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **11**, 036 (2024)
9. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Sensor response and radiation damage effects for 3D pixels in the ATLAS IBL Detector,” *JINST* **19**, P10008 (2024)
10. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Disentangling Sources of Momentum Fluctuations in Xe+Xe and Pb+Pb Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 252301 (2024)
11. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for decays of the Higgs boson into a pair of pseudoscalar particles decaying into $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 052013 (2024)
12. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross-sections in $t\bar{t}$ and $t\bar{t}$ +jets production in the lepton+jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 140 fb^{-1} of ATLAS data,” *JHEP* **08**, 182 (2024)
13. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for R-parity violating supersymmetric decays of the top squark to a b -jet and a lepton in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 092004 (2024)
14. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of Searches for Higgs Boson Pair Production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 101801 (2024)
15. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new particles in events with a hadronically decaying W or Z boson and large missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 126 (2024)
16. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for Higgs boson decays into a photon and a massless dark photon using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 153 (2024)
17. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a resonance decaying into a scalar particle and a Higgs boson in final states with leptons and two photons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 104 (2024)

18. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Simultaneous Unbinned Differential Cross-Section Measurement of Twenty-Four Z+jets Kinematic Observables with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 261803 (2024)
19. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of jet cross-section ratios in 13 TeV proton-proton collisions with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **110**, 072019 (2024)
20. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced vectorlike quarks coupling to light quarks in the lepton plus jets final state using 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 052009 (2024)
21. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark mesons decaying to top and bottom quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 005 (2024)
22. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in final states with leptons, taus, and photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 164 (2024)
23. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $t\bar{t}$ production in the lepton+jets and dilepton channels in p+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 101 (2024)
24. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Underlying-event studies with strange hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1335 (2024)
25. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Calibration of a soft secondary vertex tagger using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 032015 (2024)
26. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Beam-induced backgrounds measured in the ATLAS detector during local gas injection into the LHC beam vacuum,” *JINST* **19**, P06014 (2024)
27. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral Higgs bosons decaying into a top quark pair in 140 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 013 (2024)
28. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of boosted Higgs bosons via vector-boson fusion in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **858**, 139007 (2024)

29. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on simplified dark matter models involving an s -channel mediator with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1102 (2024)
30. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a resonance decaying into a scalar particle and a Higgs boson in the final state with two bottom quarks and two photons in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 047 (2024)
31. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the nonresonant production of Higgs boson pairs via gluon fusion and vector-boson fusion in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 032012 (2024)
32. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Precise measurements of W- and Z-boson transverse momentum spectra with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV and 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1126 (2024)
33. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced higgsinos decaying via Higgs or Z bosons to final states containing a pair of photons and a pair of b -jets with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **856**, 138938 (2024)
34. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral-current couplings between the top quark and the Higgs boson in multi-lepton final states in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 757 (2024)
35. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Light Long-Lived Particles in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV Using Displaced Vertices in the ATLAS Inner Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 161803 (2024)
36. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of electroweak $W^\pm Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 192 (2024)
37. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b- or c-jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 984 (2024)
38. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W-boson mass and width with the ATLAS detector using proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1309 (2024)
39. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Majorana neutrinos in $e^\pm e^\pm$ and $e^\pm \mu^\pm$ final states via WW scattering in pp

collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **856**, 138865 (2024)

40. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of vector boson production cross sections and their ratios using pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **854**, 138725 (2024)
41. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 191 (2024)
42. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass resonances decaying into two jets and produced in association with a photon or a jet at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **110**, 032002 (2024)
43. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged-lepton-flavor violating $\mu\tau q t$ interactions in top-quark production and decay in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” Phys. Rev. D **110**, 012014 (2024)
44. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of W^+W^- in association with jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 254 (2024)
45. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-sections for events with missing transverse momentum and jets measured with the ATLAS detector in 13 TeV proton-proton collisions,” JHEP **08**, 223 (2024)
46. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial and differential cross-section measurements of electroweak $W\gamma jj$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **84**, 1064 (2024)
47. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Precise test of lepton flavour universality in W -boson decays into muons and electrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **84**, 993 (2024)
48. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of t -channel production of single top quarks and antiquarks in pp collisions at 13 TeV using the full ATLAS Run 2 data sample,” JHEP **05**, 305 (2024) [erratum: JHEP **06**, 024 (2024)]
49. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for exclusive Higgs boson decays into $D^*\gamma$ and Z boson decays into $D^0\gamma$ and $K_S^0\gamma$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **855**, 138762 (2024)

50. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of the Energy Dependence of Diboson Polarization Fractions and the Radiation-Amplitude-Zero Effect in WZ Production with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 101802 (2024) [erratum: *Phys. Rev. Lett.* **133**, 169901 (2024)]
51. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass resonances in final states with a τ -lepton and missing transverse momentum with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **109**, 112008 (2024)
52. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new particles in final states with a boosted top quark and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 263 (2024)
53. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new Z' gauge boson via the $pp \rightarrow W^{\pm(*)} \rightarrow Z'\mu^{\pm}\nu \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp}\mu^{\pm}\nu$ process in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **110**, 072008 (2024)
54. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Lund subjet multiplicities in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **859**, 139090 (2024)
55. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for top-squark pair production, in final states containing a top quark, a charm quark and missing transverse momentum, using the 139 fb^{-1} of pp collision data collected by the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 250 (2024)
56. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for heavy spin-1 resonances using 139 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 118 (2024)
57. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Statistical Combination of ATLAS Run 2 Searches for Charginos and Neutralinos at the LHC,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 031802 (2024)
58. A. Hayrapetyan, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combination of Measurements of the Top Quark Mass from Data Collected by the ATLAS and CMS Experiments at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 261902 (2024)
59. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS forward proton Time-of-Flight detector in Run 2,” *JINST* **19**, P05054 (2024)
60. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Interpretations of the ATLAS measurements of Higgs boson production and decay rates and differential cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **11**, 097 (2024)

61. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS Run 2 searches for electroweak production of supersymmetric particles interpreted within the pMSSM,” *JHEP* **05**, 106 (2024)
62. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the Relative Sign of the Higgs Boson Couplings to W and Z Bosons Using WH Production via Vector-Boson Fusion with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 141801 (2024)
63. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of supersymmetric particles in final states with two τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 150 (2024)
64. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-production of vector-like quarks in lepton+jets final states containing at least one b-tagged jet using the Run 2 data from the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **854**, 138743 (2024)
65. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for R-parity-violating supersymmetry in final states containing many jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 003 (2024)
66. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation and performance of the ATLAS tile calorimeter in LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1313 (2024)
67. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of higgsinos in events with two Higgs bosons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **109**, 112011 (2024)
68. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Nearly Mass-Degenerate Higgsinos Using Low-Momentum Mildly Displaced Tracks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 221801 (2024)
69. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with top-quark pairs and large missing transverse momentum using 140 fb $^{-1}$ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 139 (2024)
70. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for pair-produced leptoquarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **854**, 138736 (2024)
71. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS trigger system for LHC Run 3 and trigger performance in 2022,” *JINST* **19**, P06029 (2024)

72. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total and differential cross-sections of $t\bar{t}W$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **05**, 131 (2024)
73. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances in final states with four leptons and missing transverse momentum or jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **10**, 130 (2024)
74. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of High-Transverse-Momentum Higgs Boson Production in Association with a Vector Boson in the $q\bar{q}bb$ Final State with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **132**, 131802 (2024)
75. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Inclusive and differential cross-section measurements of $t\bar{t}Z$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector, including EFT and spin-correlation interpretations,” JHEP **07**, 163 (2024)
76. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for short- and long-lived axion-like particles in $H \rightarrow aa \rightarrow 4\gamma$ decays with the ATLAS experiment at the LHC,” Eur. Phys. J. C **84**, 742 (2024)
77. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet substructure in boosted $t\bar{t}$ events with the ATLAS detector using 140 fb^{-1} of 13 TeV pp collisions,” Phys. Rev. D **109**, 112016 (2024)
78. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Z boson invisible width at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **854**, 138705 (2024)
79. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the decay of the Higgs boson to a Z boson and a light pseudoscalar particle decaying to two photons,” Phys. Lett. B **850**, 138536 (2024)
80. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $VH, H \rightarrow \tau\tau$ process with the ATLAS detector at 13 TeV,” Phys. Lett. B **855**, 138817 (2024)
81. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement and interpretation of same-sign W boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **04**, 026 (2024)
82. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles from Higgs boson decays via vector-boson-fusion production from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **84**, 719 (2024)

83. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of Searches for Resonant Higgs Boson Pair Production Using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 231801 (2024)
84. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of ZZ production cross-sections in the four-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **855**, 138764 (2024)
85. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Simultaneous energy and mass calibration of large-radius jets with the ATLAS detector using a deep neural network,” *Mach. Learn. Sci. Tech.* **5**, 035051 (2024)
86. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector,” *Nature* **633**, 542-547 (2024)
87. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a CP-odd Higgs boson decaying into a heavy CP-even Higgs boson and a Z boson in the $\ell^+\ell^-t\bar{t}$ and $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ final states using 140 fb $^{-1}$ of data collected with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 197 (2024)
88. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant production of dark quarks in the dijet final state with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 128 (2024)
89. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Improving topological cluster reconstruction using calorimeter cell timing in ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 455 (2024)
90. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of new Higgs boson interactions through nonresonant HH production in the $b\bar{b}\gamma\gamma$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 066 (2024)
91. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $2b + 2\ell + E_{\text{T}}^{\text{miss}}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 037 (2024)
92. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of $Z \rightarrow l\ell\gamma$ decays at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 195 (2024)
93. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of t-channel single-top-quark production in pp collisions at $\sqrt{s}=5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **854**, 138726 (2024)
94. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of J/ψ and $\psi(2S)$ mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 169 (2024)

95. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Exclusive W Boson Hadronic Decays $W^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma$, $W^\pm \rightarrow K^\pm \gamma$ and $W^\pm \rightarrow \rho^\pm \gamma$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **133**, 161804 (2024)
96. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 2 data,” *JINST* **19**, P02009 (2024)
97. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $Z\gamma$ decay mode of new high-mass resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **848**, 138394 (2024)
98. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Evidence for the Higgs Boson Decay to a Z Boson and a Photon at the LHC,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 021803 (2024)
99. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Azimuthal Angle Correlations of Muons Produced via Heavy-Flavor Decays in 5.02 TeV Pb+Pb and pp collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 202301 (2024)
100. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Centrality Dependence of the Dijet Yield in p+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 102301 (2024)
101. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon efficiencies in LHC Run 2 with the ATLAS experiment,” *JHEP* **05**, 162 (2024)
102. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements of the production of four charged leptons in association with two jets using the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 004 (2024)
103. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ cross section and its ratio to the Z production cross section using pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **848**, 138376 (2024)
104. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Software Performance of the ATLAS Track Reconstruction for LHC Run 3,” *Comput. Softw. Big Sci.* **8**, 9 (2024)
105. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $W\gamma\gamma$ triboson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **848**, 138400 (2024)
106. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance and calibration of quark/gluon-jet taggers using 140 fb $^{-1}$ of pp collisions at TeV with the ATLAS detector*,” *Chin. Phys. C* **48**, 023001 (2024)

107. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for quantum black hole production in lepton+jet final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **109**, 032010 (2024)
108. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for singly produced vectorlike top partners in multilepton final states with 139 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **109**, 112012 (2024)
109. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for New Phenomena in Two-Body Invariant Mass Distributions Using Unsupervised Machine Learning for Anomaly Detection at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 081801 (2024)
110. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of squarks or gluinos decaying via sleptons or weak bosons in final states with two same-sign or three leptons with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 107 (2024)
111. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for leptoquark pair production decaying into $te^-\bar{t}e^+$ or $t\mu^-\bar{t}\mu^+$ in multi-lepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 818 (2024)
112. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 78 (2024)
113. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination and summary of ATLAS dark matter searches interpreted in a 2HDM with a pseudo-scalar mediator using 139 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data,” *Sci. Bull.* **69**, 3005-3035 (2024)
114. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant production of semi-visible jets using Run 2 data in ATLAS,” *Phys. Lett. B* **848**, 138324 (2024)
115. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of WZ γ Production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 021802 (2024)
116. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider: a description of the detector configuration for Run 3,” *JINST* **19**, P05063 (2024)
117. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP-invariance of the Higgs boson in vector-boson fusion production and in its decay into four leptons,” *JHEP* **05**, 105 (2024)

118. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-philic heavy resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 157 (2024)
119. G. Aad, 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) [erratum: *Phys. Lett. B* **854**, 138734 (2024)]
120. G. Aad, 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)]
121. G. Aad, 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) [erratum: *Phys. Lett. B* **858**, 138998 (2024)]
122. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the CP nature of the top–Higgs Yukawa coupling in $t\bar{t}H$ and tH events with $H \rightarrow b\bar{b}$ decays using the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **849**, 138469 (2024)
123. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A precise measurement of the Z-boson double-differential transverse momentum and rapidity distributions in the full phase space of the decay leptons with the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **84**, 315 (2024)
124. G. Aad, S. Hirose, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Deep Generative Models for Fast Photon Shower Simulation in ATLAS,” *Comput. Softw. Big Sci.* **8**, 7 (2024)
125. G. Aad, 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)]
126. G. Aad, 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)]
127. J. Fernandez-Tejero, *et al.*, (S. Hirose, K. Maeyama), “Evolution of the electrical characteristics of the ATLAS18 ITk strip sensors with HL-LHC radiation exposure range”, *JINST* **20**, C01010 (2025).
128. C.T. Klein, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, K. Nakamura), “Preliminary defect level investigation in ATLAS ITk Strip Sensors using DLTS”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1065**, 169516 (2024).

129. P.S. Miyagawa, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Nakamura, K. Sato), “Analysis of the results from Quality Control tests performed on ATLAS18 Strip Sensors during on-going production”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1064**, 169457 (2024).
130. È. Bach, *et al.*, (K. Hara, S. Hirose, T. Ishii, K. Nakamura, K. Sato), “Analysis of the quality assurance results from the initial part of production of the ATLAS18 ITK strip sensors”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1064**, 169435 (2024).
131. (投稿中) Y. Takeuchi, S. Matsuura, S. Kim, T. Iida, ”Search for the radiative decay of the cosmic neutrino background through spectral measurements of the cosmic infrared background using PRIMA”, Submitted to Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems (JATIS) on Dec. 30, 2024.
132. (投稿中) 柏木隆城, 武内勇司, 飯田崇史, 金信弘, 王生尚志, 山根綾太, 前川群, 吉田拓生, 古屋岳, 松浦周二, 中山和也, ”宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索に向けた遠赤外波長用 SiO₂ 製サブミリサイズ集光器の開発”, Submitted to J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology on Mar., 2025.
133. S. Ajimura, T. Iida, *et al.*, “CANDLES-III detector: Low-background spectrometer for studying neutrino-less double β decay of ^{48}Ca ”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1069, (2024), 169982
134. Takumi Omori, Takashi Iida, S. Ishidate, M. Ishigami *et al.*, “Simulation Tool Development and Sensitivity Analysis of ^{160}Gd Double Beta Decay Search by the PIKACHU Project”, arXiv:2412.04712, Dec. 2024
135. 飯田崇史., “ ^{48}Ca の極稀崩壊を探せ！ —微弱放射線検出のための検出システム高度化—”, RADIOISOTOPES, 73, 129?137 (2024)
136. T. Dodo, T. Iida, Y. Takeuchi *et al.* (JSNS2 collaboration), ”Pulse Shape Discrimination in JSNS2”, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2025 023H02(2025), arXiv:2404.03679, DOI:10.1093/ptep/ptaf016
137. E. Marzec, T. Iida, Y. Takeuchi *et al.* (JSNS2 collaboration), ”First Measurement of Missing Energy due to Nuclear Effects in Monoenergetic Neutrino Charged-Current Interactions”, Phys. Rev. Lett. **134**, 081801 (2025), DOI:10.1103/PhysRevLett.134.081801
138. D.H. Lee, T. Iida, Y. Takeuchi *et al.* (JSNS2 collaboration), ”Evaluation of the performance of the event reconstruction algorithms in the JSNS2 experiment using a ^{252}Cf calibration source”, Nucl. Inst. Meth. A **1072** 170216 (2025), DOI:10.1016/j.nima.2025.170216

(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”, Proc. of Sci. **442** (VERTEX 2023) 032 (2024) [Proceedings of the 32nd International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX 2023)].

2. S. Kita, K. Nakamura, *et al.*, “Development of AC-LGAD detector with finer pitch electrodes for high energy physics experiment”, JPS Conf. Proc. **42**, 011030 (2024) [Proceedings of the 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022)].
3. S. Hirose, *et al.* (K. Hara, T. Ishii, K. Nakamura), “ATLAS ITk Strip Sensor Quality Assurance Tests and Results of ATLAS18 Pre-production Sensors”, JPS Conf. Proc. **42**, 011027 (2024) [Proceedings of the 31st International Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2022)].
4. Koji Sato, “ATLAS/CMS BSM Higgs Physics (including exotic Higgs and exotic Higgs decays)”,
ATL-PHYS-PROC-2024-085 (Oct 14, 2024) (<https://cds.cern.ch/record/2913349>),
Proceedings of the 20th Rencontres du Vietnam PASCOS 2024, 6-13 Jul 2024, ICISE, Quy Nhon, Vietnam.
5. (査読なし) 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 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 2023 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2023 SA6000196000, II-8 (2024)
6. 飯田崇史, “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”, 旭硝子財団助成研究成果報告, 2024 年 93 巻 論文 ID: 2024_061
7. 最前線のアイソトープ・放射線研究紹介ー私が研究者になるまでー No.49 「羊飼いやから研究者へ」 飯田崇史

〈学会・研究会発表〉

(国内)

1. 大森匠, 「PIKACHU 実験による ^{160}Gd 二重ベータ崩壊の探索感度評価」,
高エネルギー物理春の学校 2024, 2024 年 5 月 17 日 琵琶湖コンファレンスセンター
2. 柏木隆城: 宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索のためのサブミリサイズ石英基板集光器の開発,
宇宙史研究センター 2024 年度第 1 回構成員会議成果報告会 (2024 年 7 月 2 日), 筑波大学
3. 大森匠, 「PIKACHU 実験 Phase 1 のための準備と解析」,
学術変革「地下稀事象」領域研究会, 2024 年 7 月 6 日 大阪大学豊中キャンパス
4. 廣瀬 茂輝: ATLAS 実験アップグレード用ピクセル検出器の量産, 第 9 回測定器開発プラットフォーム B 研究会 (2024/09/05-06), KEK つくばキャンパス.
5. 西野 純矢: 高い位置分解能および時間分解能を持つシリコン検出器 (AC-LGAD) の時間分解能のシミュレーションと実測定の比較,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16-19 日), 北海道大学札幌キャンパス

6. 前山 滉太郎：HL-LHC ATLAS 実験シリコン検出器実機用シリコンストリップセンサーのストリップ間特性の評価,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
7. 堀越 一生：高い時間分解能を持つ半導体検出器 (AC-LGAD) の低ノイズの読み出し ASIC を用いた性能評価,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
8. 能瀬 大翔：KEK PF-AR テストビームラインにおける電子ビームを用いた MALTA2 の検出効率の評価,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
9. 村山 由亜：高い位置・時間分解能を持つ半導体検出器 (AC-LGAD) の入射位置依存性と位置分解能に関する研究,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
10. 熊山 拓海：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器のテストビーム用テレスコープへの応用,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
11. 菅原 里菜：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器用フレキシブル基板およびベアモジュールの検査システムの改善と量産初期の品質検査結果,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
12. 王生尚志：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XVII,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16 日–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
13. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索における SiO₂ 基板集光器の開発,
日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16 日–19 日), 北海道大学札幌キャンパス
14. 大森匠, 「PIKACHU 実験による ¹⁶⁰Gd 二重ベータ崩壊探索 8 解析と Phase 1 実験準備の現状」,
日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 19 日 北海道大学
15. 石鎔正太郎, 「PIKACHU 実験による ¹⁶⁰Gd 二重ベータ崩壊探索 9 GAGG 結晶の性能評価」,
日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 19 日 北海道大学
16. 飯田崇史, 「Eu:CaF₂ 結晶を用いた放射線種類とシンチレーション発光波長に関する研究」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2024), 2024 年 10 月 16 日 伊東温泉ホテル暖香園 (ポスター発表)
17. 大森匠, 「PIKACHU 実験による ¹⁶⁰Gd 二重ベータ崩壊探索の現状報告」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2024), 2024 年 10 月 16 日 伊東温泉ホテル暖香園
18. 石鎔正太郎, 「PIKACHU 実験による ¹⁶⁰Gd 二重ベータ崩壊探索 高純度 GAGG 結晶の性能評価」,

Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2024), 2024 年 10 月 16 日 伊東温泉ホテル暖香園 (ポスター発表)

19. 石上元直, 「PIKACHU 実験における ^{40}K 背景事象低減に向けた低放射能 PMT の評価」,
Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2024), 2024 年 10 月 16 日 伊東温泉ホテル暖香園 (ポスター発表)
20. 大森匠, 「PIKACHU! 宇宙! 探索中!」,
宇宙史研究センター 2024 年度第 2 回構成員会議 2024 年 12 月 16 日 筑波大学 (招待講演)
21. 飯田崇史, 「無機結晶シンチレータを用いた素粒子物理実験」,
第 6 回数理物質系学際セミナー, 2024 年 12 月 20 日 総合研究棟 B110
22. 飯田崇史, 「Eu 添加 CaF_2 結晶の発光波長による粒子識別の研究」,
第 5 回 ITDC プラットフォーム A 研究会, 2024 年 12 月 27 日 名古屋大学、東山キャンパス
23. 大森匠, 「PIKACHU 実験用高純度 GAGG 結晶の開発と性能評価」,
第 5 回 ITDC プラットフォーム A 研究会, 2024 年 12 月 27 日 名古屋大学東山キャンパス
24. 柏木隆城: 宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索に向けた石英基板サブミリサイズ集光器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2025 (2025 年 1 月 23 日), つくば国際会議場
25. 王生尚志: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索に向けた極低温増幅器の研究・開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2025 (2025 年 1 月 23 日), つくば国際会議場
26. 大森匠, 「PIKACHU Phase 1 実験の立ち上げと現状」,
第 1 回 学術変革「地下稀事象」若手研究会, 2025 年 3 月 7 日 富山大学
27. 武内勇司: C ν B 崩壊スペクトル: 素粒子実験屋のための宇宙論入門,
2024 年度 TCHoU ワークショップ素粒子構造研究部門セッション (2025 年 3 月 14 日), 筑波大学
28. 北 彩友海: HHC ATLAS 実験における陽子-陽子衝突データを用いた $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 事象の探索感度評価,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン.
29. 菅原 里菜: HL-LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器量産モジュールの 3 GeV 電子ビームを用いた性能評価,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン.
30. 堀越 一生: AC-LGAD の多チャンネル読み出しに向けた低ノイズ・低消費電力 ASIC の開発と性能評価,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン.

31. 飯田 哲：窒化ガリウム半導体を用いたピクセル検出器の特性評価,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン.
32. 王生尚志：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XVIII,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン
33. 柏木隆城：宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索における遠赤外波長対応サブミリサイ
ズ集光器の開発,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン
34. 飯田崇史, 「PIKACHU 実験による ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索 11 ～実験全体報告
～」,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン
35. 大森匠, 「PIKACHU 実験による ^{160}Gd 二重ベータ崩壊探索 12 Phase 1 実験の概要
と現状」,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン
36. 石上元直, 「PIKACHU 実験による ^{160}Gd 二重ベータ崩壊探索 11 ～40K 背景事象低
減に向けた試み～」,
日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18–21 日), オンライン

(国際会議・研究会)

1. Koji Sato, “ATLAS/CMS BSM Higgs Physics (including exotic Higgs and exotic
Higgs decays)”,
20th Rencontres du Vietnam PASCOS 2024, 6-13 Jul 2024, ICISE, Quy Nhon, Viet-
nam
2. Issei Horikoshi, “Development and performance evaluation of a low-noise and low-
power consumption readout ASIC for AC-LGADs”,
Poster session at the Workshop for Tera-Scale Physics and Beyond, 18 Dec 2024,
KEK Tsukuba campus, Japan.
3. Takashi Iida, “Two neutrino double beta decay search by the PIKACHU experi-
ment”,
Theoretical and Experimental Approaches for Nuclear Matrix Elements of Double
Beta Decays (NME25), (2025 年 1 月 20-21 日), RCNP, Osaka University, Osaka
(招待講演)
4. Issei Horikoshi, “IHP Si-Ge Readout ASICs for ACLGAD sensors“,
US-Japan workshop for AC-LGAD and testbeam, 24-25 Feb 2025, Fermilab, USA
5. Yua Murayama, “Improvement of Radiation Tolerance for AC-LGAD sensors“,
US-Japan workshop for AC-LGAD and testbeam, 24-25 Feb 2025, Fermilab, USA
6. Rina Sugawara, “Testbeam Facility at KEK and Irradiation Facility in Japan“,
US-Japan workshop for AC-LGAD and testbeam, 24-25 Feb 2025, Fermilab, USA

〈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，
2024 年 4 月 21 日，筑波大学 総合研究棟 B107
2. 筑波大学公開講座「宇宙の歴史」，2024 年 6 月 1-2 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：宇宙の歴史を紐解く，
2024 年 11 月 3-4 日，筑波大学 1B410
4. 筑波大学附属高校 大学訪問 模擬講義 受川 史彦：「素粒子のふしぎ」
2024 年 6 月 25 日，筑波大学 自然 D312
5. 筑波大学附属駒場高校 大学訪問 模擬講義 受川 史彦：「素粒子とは何か」
2024 年 12 月 17 日，筑波大学 1E202

〈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，2025 年 2 月

1. 王生 尚志：COBAND 実験に向けた ESD 保護回路付き極低温増幅器の性能評価
2. 熊山 拓海：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器量産に向けた品質保証システム開発およびテストビーム用テレスコープへの応用
3. 西野 純矢：高い時間分解能と位置分解能をもつ半導体検出器 AC-LGAD の電極細密化と時間分解能の測定
4. 能瀬 大翔：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセル検出器のノイズ評価及びモノリシック型 CMOS ピクセル検出器 MALTA2 の 3 GeV 電子ビームを用いた性能評価
5. 前山 滉太郎：HL-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センサー特性の詳細な理解

(卒業論文)

理工学群 物理学類，2025 年 2 月

1. 石上 元直：PIKACHU 実験における 40K 背景事象低減に向けた研究