

II. 素粒子実験グループ

教授	受川 史彦
准教授	武内 勇司、原 和彦
講師	佐藤 構二
助教	飯田 崇史、廣瀬 茂輝 (R2.3.16～)、大川 英希 (～R1.5.31)
特命教授	金 信弘
教授	Soo-Bong KIM (海外教育研究ユニット招致、～R2.2.29)
教授	吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員)
准教授	池上 陽一 (クロスアポイントメント教員)
大学院生	15名
学群4年次生	5名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子衝突型加速器を用いた国際共同実験 CDF および 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。CDF は 2011 年度に運転終了、ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始した。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。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 の開発や SOI や LGAD 技術を用いた次世代粒子検出器の開発を行っている。大川助教は 5 月 31 日に中国復旦大学教授として転出し、3 月 16 日よりドイツ・フライブルグ大学から廣瀬助教が加わった。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。令和元度は、3 名の学外研究者を本学教員として招き、より密接な共同研究の体制のもと、共同研究を行っている。

[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の陽子・陽子衝突型加速器である。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。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 13 TeV で衝突実験を行った。2019 年～2020 年は、アップグレードのためのシャットダウン中であり、2021 年からの Run-3 実験で、さらに多くの陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。

図 1 に ATLAS 実験で取得した年ごとのデータ量を示す。Run-2 で ATLAS 実験は、2015 年に 3.7 fb^{-1} 、2016 年に 35.9 fb^{-1} 、2017 年に 46.9 fb^{-1} の衝突データを取得したのに引き続き、2018 年も LHC 加速器、ATLAS 検出器ともに順調に運転し、 63.3 fb^{-1} のデータを記録した。

現在、2015-2018 年度に取得した Run-2 実験の全データを用いてさまざまな物理解析が行われている。これは 139 fb^{-1} に相当し、これまで解析してきた 2016 (2017) 年までの $36(80) \text{ fb}^{-1}$ と比べ、データ量が大幅に増えている¹。

¹検出器に不具合がある状況で取得したデータは物理解析には用いない。解析に使われるデータ量が記録された全データ量より少ないのはこのためである。

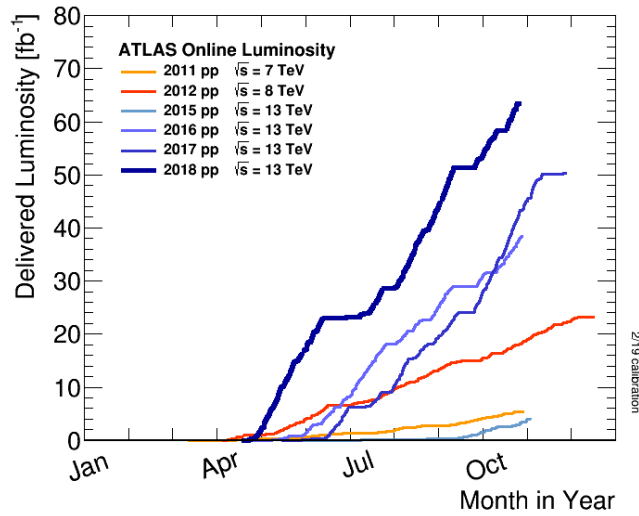


図 1: ATLAS 実験で取得したデータ量の年ごとの推移。

(1) ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 実験により、2012 年に発見された。Run-1 のデータ解析により、スピン・パリティの測定結果が標準理論の値 0^+ と整合がよいことが既に確認されている。Run-1 ではヒッグス粒子が弱ゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$ 、 $H \rightarrow WW^*$ の崩壊モードおよび、トップクォークのループ・ダイアグラムが寄与する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、 5σ を超える有意度で観測された。とくに、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ と $H \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。

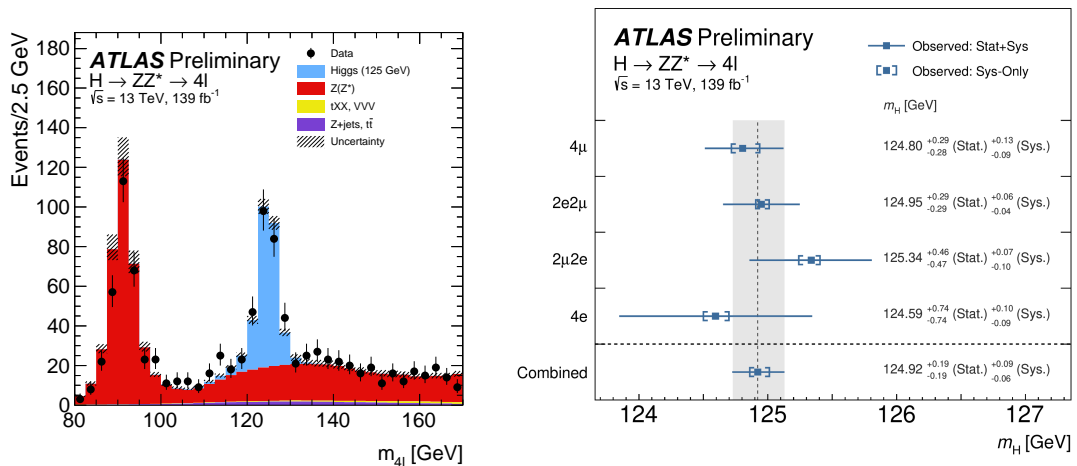


図 2: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 崩壊チャンネルでのヒッグス粒子質量測定。測定に使われた候補事象の不変質量分布 (左) と 4 つのサブチャンネルでの測定結果の比較 (右)。

2018 年には、Run-2 の 36 fb^{-1} のデータを Run-1 の全データに加え、これら 2 崩壊チャンネルを解析した結果、ヒッグス粒子の質量は $124.97 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$ と測定されていた。2019 年には、 139 fb^{-1} を解析した $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 崩壊チャンネル単独の質量測定で、ヒッグス

粒子の質量は $124.92^{+0.21}_{-0.20}$ GeV/ c^2 と測定された。図2にこの解析での不変質量分布と、4つのサブチャンネルでの測定結果を示す。

Run-1のデータの詳細な解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊がATLASとCMS両実験の合同結果で 5σ を超える有意度で観測されていたので、Run-2が始まる前に、ヒッグス粒子のフェルミオン対への崩壊も観測されていた。2018年度には、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する事象と、ヒッグス粒子とトップクォーク対が随伴生成される過程がそれぞれ観測された。これらにより、LHCでは研究が難しいニュートリノを除いて、第3世代のフェルミオンとヒッグス粒子の間の結合がすべて確認できたことになる。

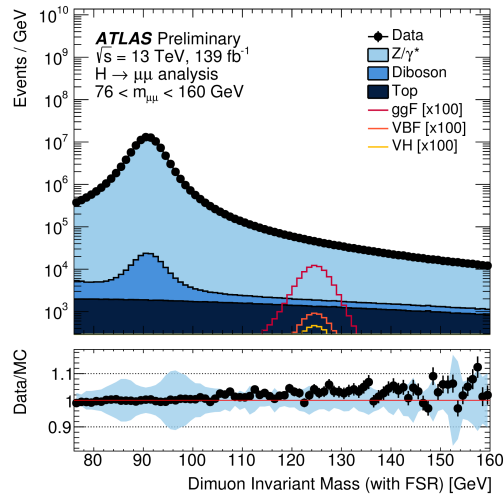


図3: $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析での2つの μ 粒子の不変質量分布。

続いて、第2世代のフェルミオンの質量の起源もヒッグス粒子であることを確かめることが大切である。ATLAS実験では、 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の観測を目指している。図3に、2019年度に公表した解析における2つの μ 粒子の不変質量分布を示すが、いまのところバックグラウンドとの一致がよく、信号は確認できていない。ヒッグス粒子の生成断面積と $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊分岐比の積に対して、標準理論の予言値の1.7倍より大きい値を95%の信頼度で棄却した。

ヒッグス粒子は標準模型において質量の起源となる特異な粒子であり、その性質を詳しく測定して標準理論を厳しく検証することは重要である。ATLAS実験では、ここまで述べてきた通り、さまざまなヒッグス粒子の生成、崩壊過程を個別に測定し、標準理論の予言と比べている。同時に、これら複数の解析チャンネルでの測定結果を総合的に解析することで、より精度よくヒッグス粒子と他の標準理論粒子との結合の強さを測定することができる。2019年度には、 80 fb^{-1} のデータを用いて様々な生成崩壊モードの測定結果からヒッグス結合の測定をアップデートした。 $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ^*, WW^*, \tau\tau, b\bar{b}, \mu\mu$ および、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過程の探索、オフシェルでの $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell/2\ell 2\nu$ の各チャンネルの解析で得られた結果を同時にフィットすることで、ヒッグス粒子に関する基本物理パラメータを解析した。図4に、得られたフィットの結果を示す。左の図は、全解析の結果を同時フィットすることで、さまざまなヒッグス粒子の生成過程 i と崩壊過程 f の組み合わせに対して、断面積 σ_i と分岐比 B_f の積 $(\sigma \times B)_{if}$ を測定した結果である。右の図は、さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合を標準模型の値で規格化した結果である。ヒッグス粒

子のさまざまな粒子への結合の測定結果は、いまのところ標準理論とよく一致している。

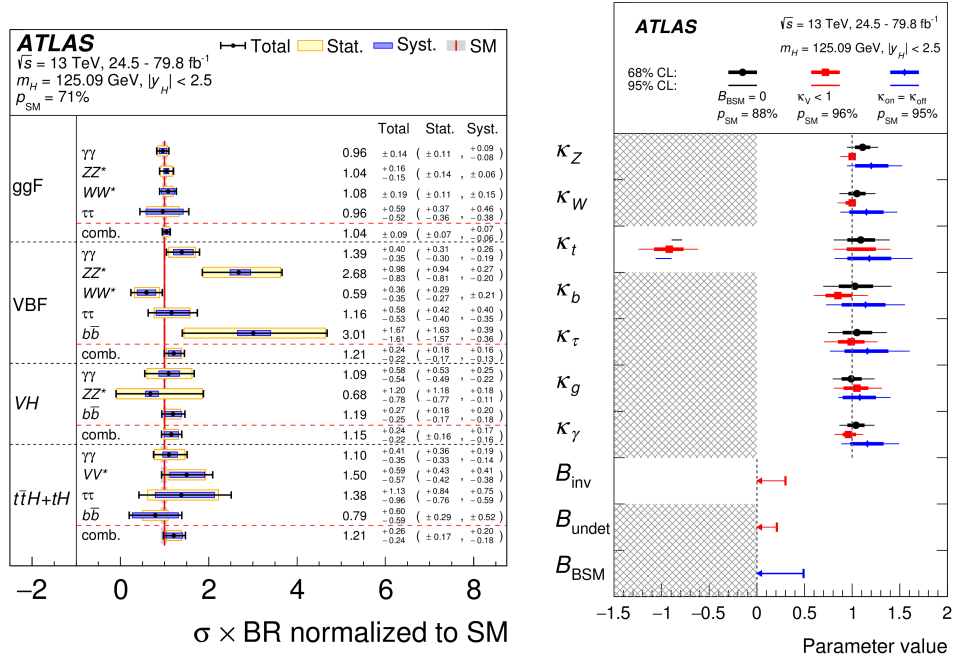


図 4: ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して、断面積と分岐比の積を測定した結果。結果は標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を、標準理論の予言する結合の値で規格化して表示している。光子とグルーオンの結合も実効的な量として測定する。フィットは、ヒッグス粒子が標準理論通りの崩壊しかしない場合 (黒)、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊への探索結果を考慮した場合 (赤)、オフシェルでの $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell/2\ell 2\nu$ 解析からのヒッグス粒子の質量幅への制約を考慮した場合 (青) の 3 通りで行った。

(2) 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結合を測定できる。一方で、たとえば重い中性ヒッグス粒子など、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予言する理論も多い。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予言する頻度よりもはるかに頻繁に起こりうる。

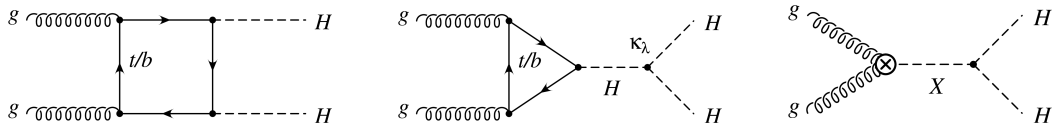


図 5: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己結合による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

ATLAS 実験では、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を、 $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 、 $HH \rightarrow W^+W^-W^+W^-$ 、 $HH \rightarrow W^+W^-\gamma\gamma$ 、 $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ の各崩壊モードで探索した解析結果を 2019 年に公表した。36 fb^{-1} のデータを解析した結果、

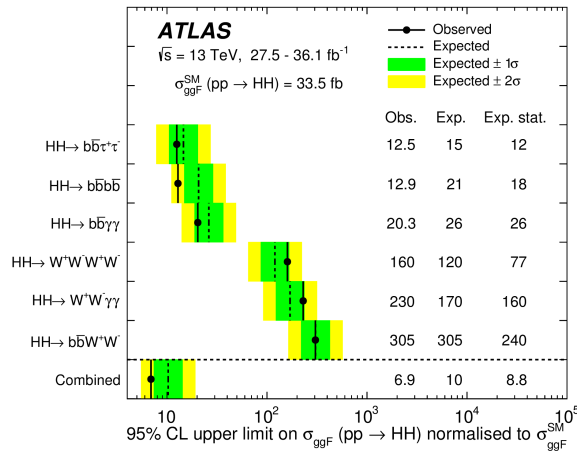


図 6: 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。標準理論の予言値で規格化して表示している。

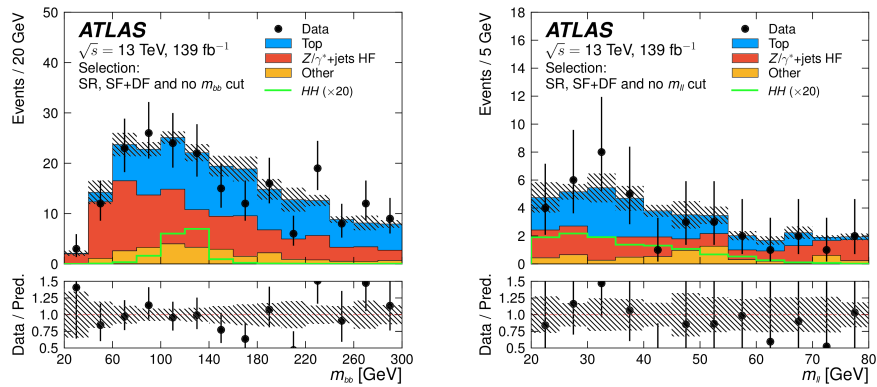


図 7: $HH \rightarrow bbl\nu l\nu$ 崩壊する 2 ヒッグス過程の探索解析。2 つのレプトンが同じフレーバー (左) と異なるフレーバー (右) でチャンネル分けをして解析した。

信号は確認されず、データはバックグラウンドとよく一致した。図 5 にこれら解析で得られた 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限を示す。全解析モードを合わせることで、標準理論が予言する生成断面積の 6.9 倍以上の断面積を棄却した。以上の結果をまとめた後で、ATLAS 実験では 2 つのヒッグス粒子が生成される事象を全 Run-2 データを使って探索している。2019 年度には、 139 fb^{-1} のデータを用いて $HH \rightarrow bbl\nu l\nu$ 事象の探索結果をアップデートした。事象中の 2 つのレプトンのフレーバーにより 2 つの解析チャンネルに分けて解析を行ったが、データはバックグラウンドとよく一致し、信号は確認されなかった (図 7)。2 ヒッグス生成断面積に対して 1.2 pb の上限を得たが、これは標準理論の予言する断面積の 40 倍に相当する。図 6 の同じチャンネルでの解析と比べると、解析感度が飛躍的に向上したことが見て取れる。

(3) 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

標準理論では、単一の中性電荷のヒッグス粒子を予言する。一方で、有力視されている超対称性理論をはじめ、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。

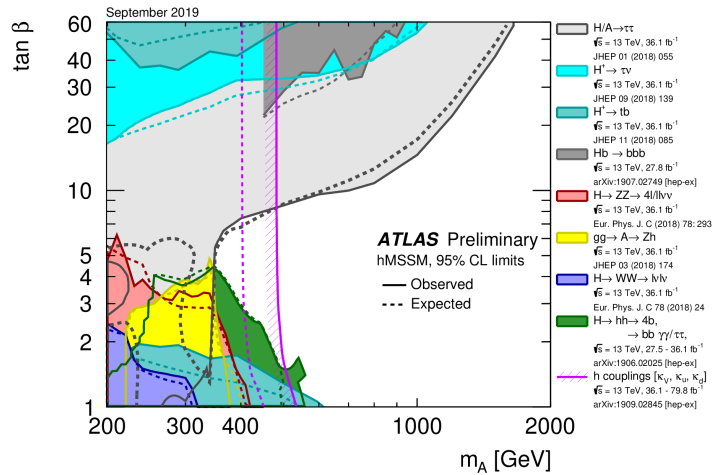


図 8: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見されている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子質量に関して得られる間接的な制約。

ATLAS 実験では、既に発見されているのとは別のヒッグス粒子を多くの物理解析で探索している。 36 fb^{-1} のデータを使った直接探索解析の結果による h_{MSSM} シナリオに対する制約をまとめたのが図 8 である。

2020 年 2 月には、全 Run-2 データを用いて $\tau\tau$ 終状態に崩壊する重い中性ヒッグス粒子を探索した解析結果が公表された。この解析では、重いヒッグス粒子がボトムクォークを伴わないで生成される場合と伴って生成される場合をチャンネル分けして解析しているが、それぞれのチャンネルのうちで片方の τ がレプトンに、もう片方がハドロンに崩壊する事象の m_T 分布と、この解析で得られた h_{MSSM} シナリオへの制約を図 9 に示す。

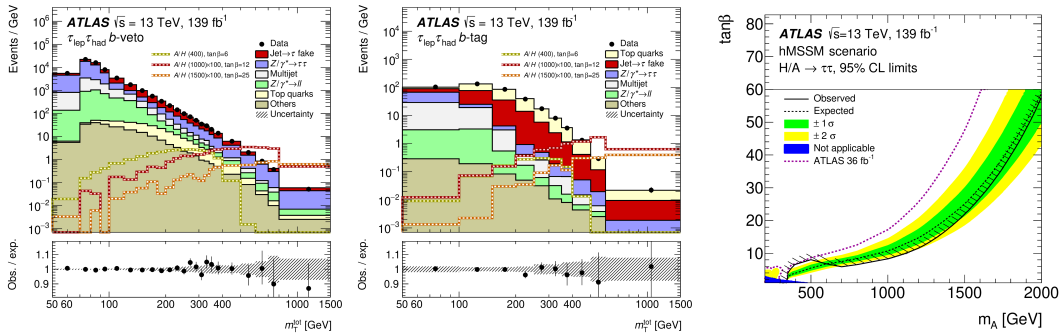


図 9: ATLAS 実験の 139 fb^{-1} のデータを用いて $\tau\tau$ 終状態に崩壊する重い中性ヒッグス粒子を探索した解析結果。(左) 重いヒッグス粒子がボトムクォークを伴わないで生成されるチャンネルと (中) 伴って生成されるチャンネルでの m_T 分布、および (右) 得られた h_{MSSM} シナリオに対する制約。

2019 年度には、ほかにも多くの物理解析が全 Run-2 データを用いて行われ、2020 年度以降にさら多くの新しい解析結果が公表される予定である。

(4) ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループでは、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。Run 2 運転では、高輝度環境下におい

でも安定して運転可能なシステムの確立に既に成功しており、2019年から2020年にかけてのLHCシャットダウン期間中では、今後の運転に向けた大きなアップグレードは予定されていない。よって、故障部品の交換などがこの期間の実験現場における主な作業となる。また、これまで10年以上にわたってハドロンコライダーの厳しい実験環境下で運転されてきたSCT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。シャットダウン期間中を利用し、様々なデータを使ってシリコンセンサーの現在の状態を詳細に評価した上で、Run 3運転中に起きうる性能低下などの問題を予測し、それらに迅速に対応するための解析ツールを開発しておくことも重要となる。

(a) シリコンセンサーの性能評価

荷電粒子の通過をシリコンセンサーからの信号としてとらえられる確率であるヒット検出効率は、SCTの最も重要な性能指標となる。図10はRun 2運転最終年である2018年における、SCTの各領域ごとのヒット検出効率である。ここから、Run 2の終了直前においてもなお99%以上の高いヒット検出効率を維持できていたことがわかる。現在は、放射線損傷を受けたシリコンセンサーの特性に対する理解をさらに深めるため、Run 2運転期間中にとられた膨大な量のデータを使った詳細な検出効率の評価を行っている。例えば、80 μm 間隔で並んだストリップ間の荷電粒子の入射位置の関数としてのヒット検出効率測定を行った。2001年に実施したビームテストによると、シリコンバルクに放射線損傷を受け、電荷収集効率などが変化したシリコンセンサーにおいて、ストリップのちょうど中間に荷電粒子が入射した場合に、わずかなヒット検出効率の低下がみられた。この傾向を、実際の実験において収集されたデータで初めて確認しようと試みている。

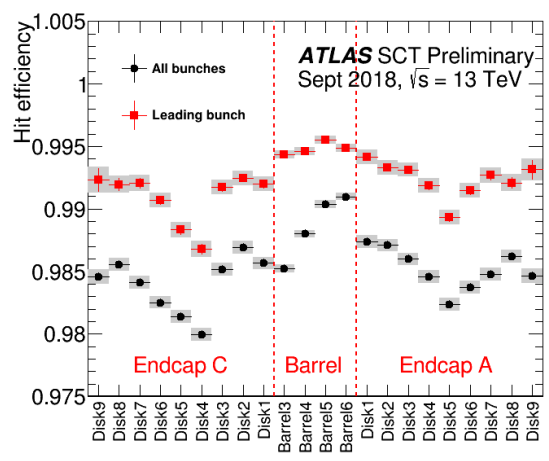


図 10: 2018 年 9 月の典型的な陽子陽子衝突ランにおける、各バレル部レイヤーおよびエンドキャップ部ディスクのヒット検出効率。赤点が、陽子ビームを構成する 25 ns 間隔のバンチ列のうち、一番先頭で測定したものであり、SCT 固有のヒット検出効率を示す。黒点はバンチ列に含まれるすべての衝突を使って測定したもので、データ収集においてノイズを抑制するために組み込まれているメカニズムにより多少効率が落ちるが、なお 98% 以上の高いヒット検出効率を維持している。

SCT のヒット検出効率を保つには、シリコンバルクを完全に空乏化させるのに十分な電圧をかけておく必要がある。しかし、放射線損傷を受けたシリコンセンサーの完全空乏化電圧 (V_{FD}) は、型反転後徐々に上昇している。もし、Run 3 運転期間中に V_{FD} が印可可能な最大電圧を超えてしまうと、ヒット検出効率を維持できなくなってしまう。SCT の信号は、デジタル化されたバイナリー情報としてのみ読み出されるため、 V_{FD} を直接測定するのは困

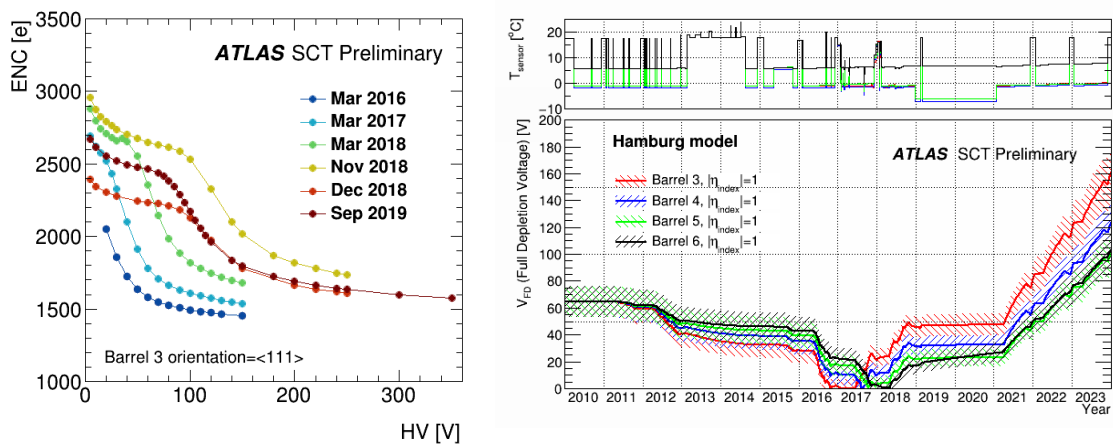


図 11: (左) 2016 年から 2019 年にかけて測定された、ノイズ (equivalent noise charge; ENC) と印可電圧 HV との関係。2017 年以降に、概ね 20 から最大 100 V 付近に“ニー”と呼ぶ凸の変曲点構造が現れている。(右) ハンブルクモデルにもとづいた、2010 年から 2023 年までの全空乏化電圧の変化予想。色の違いは、全 4 層あるバレルレイヤーの 1 層目から 4 層目に対応する。

難であるが、印可電圧を変えながら様々な性能指標の依存性を測定することで、推測することができる。図 11 (左) は、その一例で、ノイズの印可電圧依存性を測定した結果である。数 10 から 100 V 付近に、“ニー” (knee) と呼ぶ特徴的な依存性の変化が見えるが、このあたりでシリコンバルクが完全に空乏化し、静電容量特性の電圧依存性が変わるためノイズが減少する。図 11 (右) には、ハンブルクモデルと呼ばれる、 V_{FD} を被ばく放射線量の関数として計算する経験式にもとづいた予想値を示している。ノイズの印可電圧依存性からは、現在の V_{FD} は 100 V 程度であると推測されるが、これは予想値よりも約 50 V 高い。そのほか、ヒット検出効率や漏れ電流の印可電圧依存性も測定しており、現在これらを統合的に解析し、 V_{FD} のさらなる理解を進めている。いずれにしても、Run 3 運転終了時においても V_{FD} 圧は高々 160 V 程度と見積もられており、SCT の安全運転が保障されている 500 V には十分な余裕がある。従って、Run 3 運転終了まで確実に SCT は運転可能である。

(b) Run 3 運転に向けた性能解析ツール開発

LHC は Run 2 運転期間の中で順調にビーム輝度を向上し、瞬間ルミノシティーは設計値の 2 倍である $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達した。今後の Run 3 運転では、この値が標準的な運転条件になる予定である。これは、物理解析に使用可能な統計量を大幅に増加させられるというメリットがある反面、前節で述べたように、放射線損傷によって徐々にセンサーが劣化してきている SCT にとっては有効な運転環境のモニターが必要となる。図 10 で既に示したように、現在のところ大きな性能低下は見られていないが、Run 3 運転中には 4088 台の SCT モジュールのうちビームに近い一部の性能が顕著に低下してくると予想している。そこで、各モジュールの性能指標をデータベース化し、ウェブブラウザ上でまとめて表示することで、そのようなモジュールを迅速に発見し、印可電圧や冷却温度などの条件を整え、性能を回復するようにする。図 12 は、ヒット検出効率が低いモジュールを、過去数ラン分に渡ってウェブブラウザで表示したものである。このように、SCT 運転エキスパートは問題のあるモジュールを簡単に発見し、さらに該当モジュールの詳細情報を閲覧することで問題を理解し、必要な対処を施せる。現在、ヒット検出効率や、データ処理時のエラーをデータベースに蓄積しており、実際に SCT 運転エキスパートが、Run 2 運転中に発生した問題の

解析などに利用し始めている。今後、印可電圧や電流などの情報を追加し、このツールだけで SCT モジュールの状況を一目で把握できるようにすることを目指している。



図 12: SCT 性能解析ツールのウェブブラウザ上での表示例。横方向には、ヒット検出効率がラン（データ収集の区切り）ごとに時系列で比較される。各行はモジュールに対応し、2022 から始まる番号がシリアルナンバーを示す。ヒット検出効率が悪いものから順に並べられ、この表示例では先頭行のモジュールのヒット検出効率が、ラン番号 367364 から 367384 にかけて急激に低下している。これにより、このモジュールへの対処が必要であると視覚的に判断できる。

[2] HL-LHC ATLAS 実験用 Si 半導体センサーの開発

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え 4000 fb^{-1} のデータ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計値を超え、また、粒子数密度も増大するので、ATLAS 内部飛跡検出器は、衝突点に近い内側 5 層は電極サイズが $50 \times 50 \mu\text{m}$ のピクセル型、その外側 4 層は $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$ のストリップ型からなる、全てシリコン半導体検出器で構成される新しい内部飛跡検出器 ITk に置き換えられる。筑波大グループは主にこれらセンサー設計を分担している。

(1) HL-LHC 用 ATLAS ストリップ型センサー

2019 年 4 月にセンサー設計の外部レビュー (FDR:Final Design Review) が行われ、その結果、浜松ホトニクス社のみがセンサー供給者として選定された。これを受けて 19 年度に全体量の 1/20 の予備量産が行われた。日本グループは筑波大が中心となってバレル部センサーの半数の品質管理を分担し、この予備量産の期間に検査体制の確認を行った。センサーたわみの測定及びセンサー表面状態の撮影について、これらはセンサー製造工場で実施するために、人手に頼らないオートフォーカス顕微鏡に基づく全自動計測システムを作製した (図 13)。予備量産の 318 センサーの測定はトラブルなく 3 日間で完了した。たわみの測定例と最大たわみ量の分布を図 14 に示す。モジュール製作からの要求はたわみ量を $300 \mu\text{m}$ を押さえることであるが、すべてのセンサーが要求値を満たした。

本体センサーの品質管理 (QC) に加えて、同時にプロセスするテストチップを用いた品質保証 (QA) も系統的に行われる。従来より行ってきた 1 cm 角のミニチュアセンサー (mini) を用いた電荷収集量の評価、新しく導入した様々なテスト構造を組み入れたテストチップ

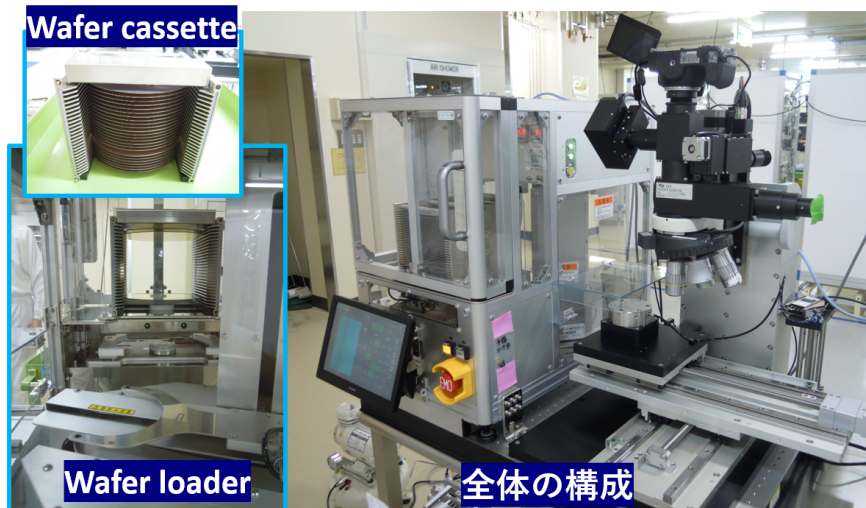


図 13: センサーの品質管理のための検査システム。オートフォーカスによる顕微鏡システム、XY ステージ、自動ウェハローディングシステムで構成される。センサーは 25 枚までウェハークセットに収納され、このカセットは他の検査でも共通して用いられる。

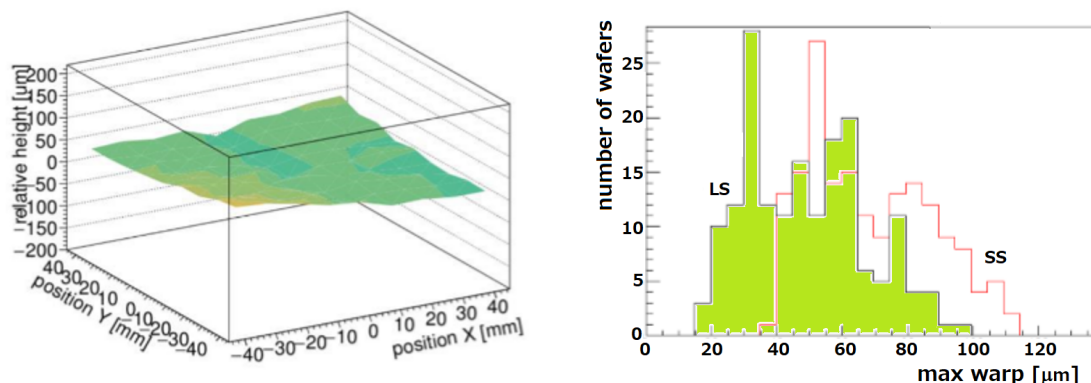


図 14: センサーたわみの測定例（センサーサイズは約 10 cm×10 cm）と、たわみ量の最大値の全センサーについての分布（2 種類のストリップ長 2.4 または 4.8 cm で分類）。

(TC) による評価、8 mm 角のダイオード (MD8) の評価が行われる。mini については分担評価する世界の 5 機関で同条件のセンサーを用いて電荷収集量の測定値を比較し、筑波大は評価サイトとして認定された (図 15)。TC および MD8 についてはリレーを用いた測定系を作製したが調整は 2020 年度に行う。

ITk ストリップ型センサーの開発と試作に関しては、広島国際シンポジウム (HSTD12) で報告され、電荷収集量に関しては原が代表して報告を行った。また将来の実験を見越した $10^{17}/\text{cm}^2$ 照射後の振る舞いについては、佐藤 (M1) が同学会で報告した。

(2) HL-LHC 用 ATLAS ピクセル型センサー

ITk バレル部の 5 層のピクセルセンサーの内、日本グループは 3~5 層目に使用できるバイアス構造のある n^+ -on-p 型プラナーピクセルセンサーの設計を浜松ホトニクスと進めてきた。

ピクセルサイズについてはプロトタイプ ASIC である RD53A を用いて、 $50 \times 50 \mu\text{m}$ お

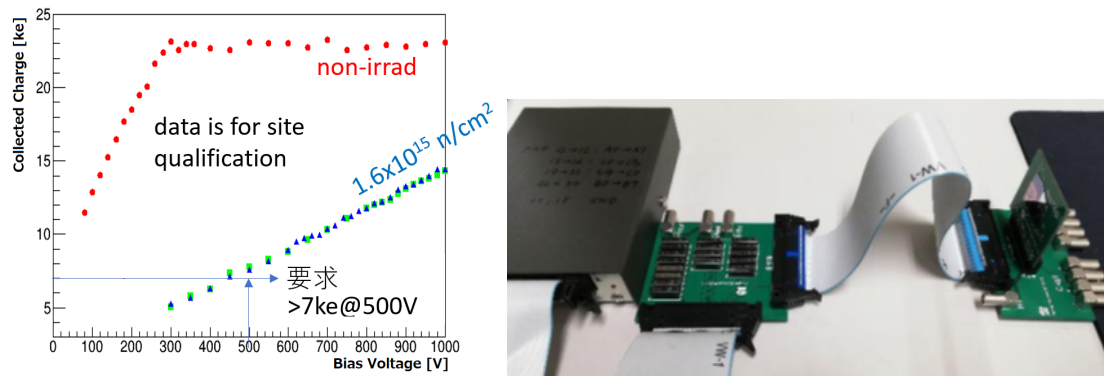


図 15: 品質保証試験のうち、電荷収集量の評価（未照射および2つの照射済みセンサー）結果と TC/MD8 の測定系。電荷収集量に関しては、 $1.6 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 照射後の電荷収集量が 500 V のバイアス電圧で 7,000 電子数以上の要求を満たす。

よび $25 \times 100 \mu\text{m}$ のピクセルサイズのセンサーを比較し、 $50 \times 50 \mu\text{m}$ の方がクロストーク量が少ない等をテストビームを用いて評価した。また、バイアス構造のためにノイズ量はやや増えることが分かっていたが、RD53A では3種類のフロントエンド回路を比較評価のために実装しているため、異なる回路間の影響があることを解明した(図 16)。影響を排除するとノイズ量は 130 電子となり、バイアス構造がない場合の 80 電子より劣るものの十分に使用可能な水準である。実際に想定される放射線量（安全係数 1.5 を含んで $3.8 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ ）照射後でもビームテストの結果から十分に高い検出効率を得られることを示した。

2019 年度にいくつかのセンサー供給先からの試作品を比較評価する予定であったが全候補からのサンプルが未着であるため、浜松ホトニクス社製をふくめた数候補で予備 FDR を 2020 年度に行う。バイアス構造の有無などの差異があるが、全製造プロセスの効率なども総合的に評価して仕様が決定される。

ピクセルモジュール製造については、従来は ASIC へのバンプ形成は海外で行うと想定していたが、国内企業を新たに加え、フリップチップ化までを一貫して進められる体制の構築をすすめた。ASIC の厚さ $300 \mu\text{m}$ に対する試作評価は完了し、現在最終的な $150 \mu\text{m}$ 厚の試作を進行中で、その結果も予備 FDR に間に合わせる予定である。

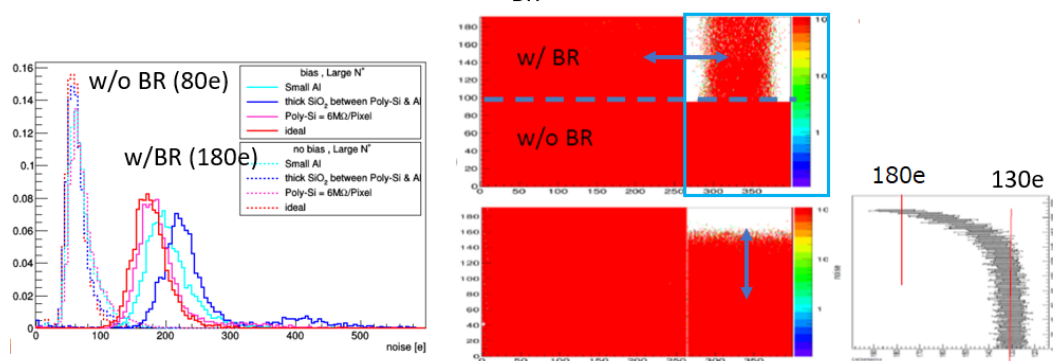


図 16: (左) バイアス構造の有無によるノイズの分布。(中) RD53A でのアナログ応答の分布(右 1/3 の領域が ATLAS が使用するフロントエンド設計である)。上半分はバイアス構造が有り、無い下半分と比較すると左右でアナログ応答がノイズのために不良となる。中央上図はバイアスラインを左右に共有しているため隣接部からの影響を受けている。下図はセンサーと ASIC を 90 度回転させ、バイアスラインの共有を上下にした。(右) 90 度回転した配置で、ノイズ量のコラム方向依存性。

CERN や DESY でのテストビームでは参照飛跡は備え付けのピクセルセンサーで検出されるが、FNAL での試験のために図 17 のようなシステムを作製し、実際に 2020 年 2-3 月に行ったビームテストに用いた。

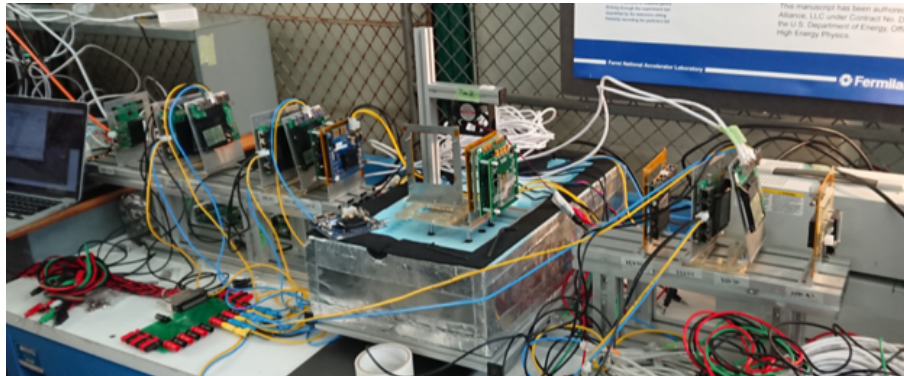


図 17: テストビームでの参照飛跡を再構成するシステム。評価対象センサーは中央の断熱ボックス（カバーは外した状態）内に設置し温度管理する。

【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が飛躍的に向上する。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が可能である。半導体検出器の優れた位置分解に加え時間情報を得ることができれば、HL-LHC やさらに高輝度の加速器実験で要請される、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成に大きな役割を果たすことが期待できる。PET 等の医療機器への応用も視野にある。

LGAD は 1.3 mm 角のパッドタイプのものが HL-LHC 実験用に ATLAS で設計中である。飛跡検出器とするためには電極の一層の細分化が必要であり、2018 年度には TRENCH 溝による電極分離を TCAD シミュレーションを用いて評価した。その結果は 2019 年の Vertex2019 国際会議で報告した (和田 D1)。2019 年は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 の設計をすすめた。図 18 に AC-LGAD の概念図および TCAD への実装を示す。最も重要な設計パラメータは増幅層の濃度で n^{++} 濃度が高いままだと誘起された信号電荷が広がり位置測定ができなくなるが低すぎると増幅が十分でなくなる。図 19 は中央電極に信号を誘起させた場合の隣接電極を含めた誘起信号の時間変化である。信号が分離でき、かつ適度に信号が GND に流れる条件を探した。2019 年度から科研費を受け、AC-LGAD の設計に基づいては浜松ホトニクスで試作をした。2020 年度に実際の評価を進める。AC-LGAD の設計については大鳴 (M2) が HSTD12 国際学会で報告した。

時間分解能の評価は従来、テストビームを用いて行ってきたが、開発を促進するために β 線を用いたテストベンチシステムを構築した (図 20)。2 枚のセンサーを重ね、 β 線による波形を 5 GHz の FADC で記録する。時間差分布から得られる時間分解能はテストビームによる 30 ps と比べてやや劣る (36 ps) が、バイアスや温度条件を変えられるなど簡便さは利点である。

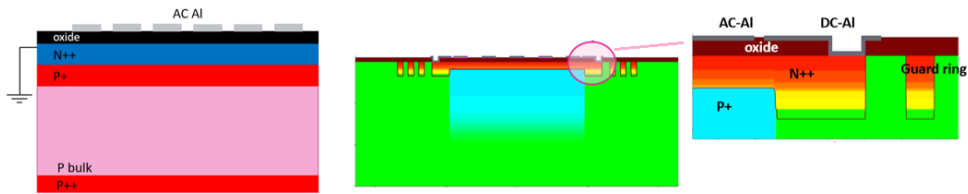


図 18: (左)AC-LGAD 構造の概念図。増幅層は一樣に配置される。(中) TCAD 内に $80\mu\text{m}$ ピッチで 5 つの AC 電極を配置した。(右) GND に接合する両端の DC 電極部の詳細を右に示す。

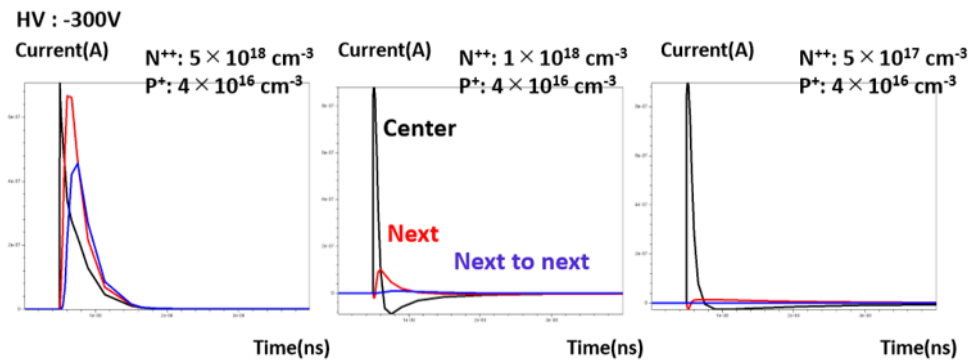


図 19: 中央電極に荷電粒子を通過させたときの誘起電流の時間変化を隣接 2 電極まで示した。適切に信号が分離でき、また十分に応答時間の短いように電極へのドーピング濃度を調整する。

【4】 SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。我々は将来の素粒子実験に用いることのできるピクセル検出器として、BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器を Lapis セミコンダクター社の $0.20\ \mu\text{m}$ SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究している。

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導して進めてきた。2019 年度は、PDD をもつセンサーの放射線耐性を評価した。また、国際リニア衝突器 ILC (International Linear Collider) 実験用に SOFIST センサーを開発してきたが、TIA (Tsukuba Innovatio Arena) による連携プログラム探索推進事業「TIA かけはし: 3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」の成果を取り入れて、SOI ピクセル検出器で初めて 3D 化した SOFIST4 の試作に成功した。

(1) PDD 構造をもつセンサーの放射線損傷の基礎研究

Pinned-depleted diode (PDD) は固定電位層を配置して検出器容量を増やすことなくピクセル周辺部を含めた全領域からの電荷収集効率をあげる設計である。エネルギー分解能に優れている点が特筆されるが、固定電位層の電圧を調整することで放射線損傷による性能劣化を補償できる可能性がある。PDD 構造をもつセンサーとして京都大らが開発している

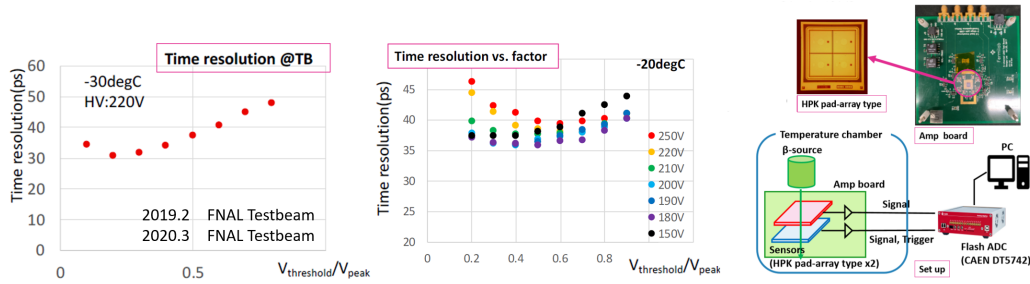


図 20: LGAD の時間分解能の測定。(左) テストビームによるもの、(右) β 線用いたテストベンチシステムによるもの。

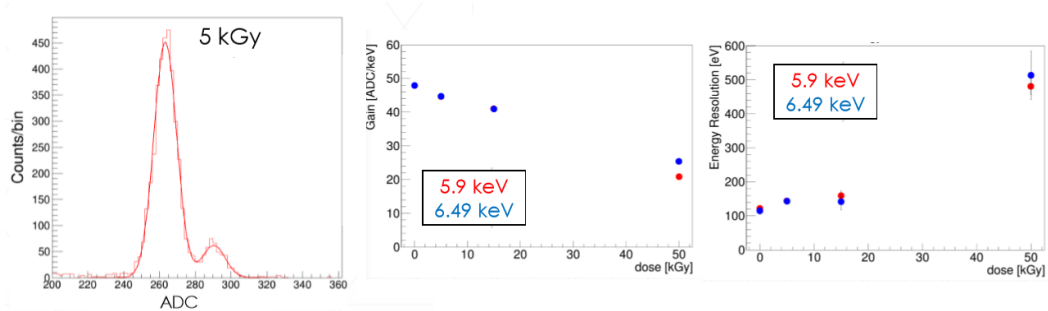


図 21: PDD 構造をもつセンサーの 5 kGy 照射後の ^{55}Fe に対する応答。5.9 および 6.49 keV に対するピークが観測されている。ピーク位置から評価するゲインおよびエネルギー分解能の照射量依存性。

XRPIX6E を用いて、 ^{60}Co γ 線を照射してゲインおよびエネルギー分解能の劣化を評価した (図 21)。顕著な劣化はあるもののセンサーとして 50 kGy までは応答があることを初めて示すことができた。

(2) SOFIST3

SOFIST3 は時間と位置測定を同一ピクセルでできる最初のセンサーであり、ピクセルサイズは $30\ \mu\text{m}$ 角とやや大きいが、同一ピクセルに 3 ヒットまで対応できるメモリが実装され ILC 実験に対応できる性能をもつ。2019 年 3 月にビーム試験を FNAL で行った。図 22 は 2 枚のセンサー (IP11 と IP15) について、同一ヒットに対して隣接 2 ピクセルのみが応答している場合について 2 ピクセルで測定された時間差分布をそれぞれに示す。分布は時間分解能の $\sqrt{2}$ 倍に相当する。これに対して直接 2 枚のセンサーの時間差分布から得られる時間分解能 $1.87\ \mu\text{s}$ はやや劣る。これは、隣接 2 ピクセルでは時間校正の不確かさの影響は小さいが、異なる 2 センサー間では影響が残り、時間校正に不確かさが残ることを意味する。しかしながら、時間測定のみで特化した SOFIST2 で得た $1.55\ \mu\text{s}$ と比肩でき、SOFIST 方式により $2\ \mu\text{s}$ より優れた時間分解能が達成できることを実証した。ILC のビームトレイン長 $720\ \mu\text{s}$ 内の衝突をこの精度で分離できることは SOFIST の優れた性能と特筆できる。

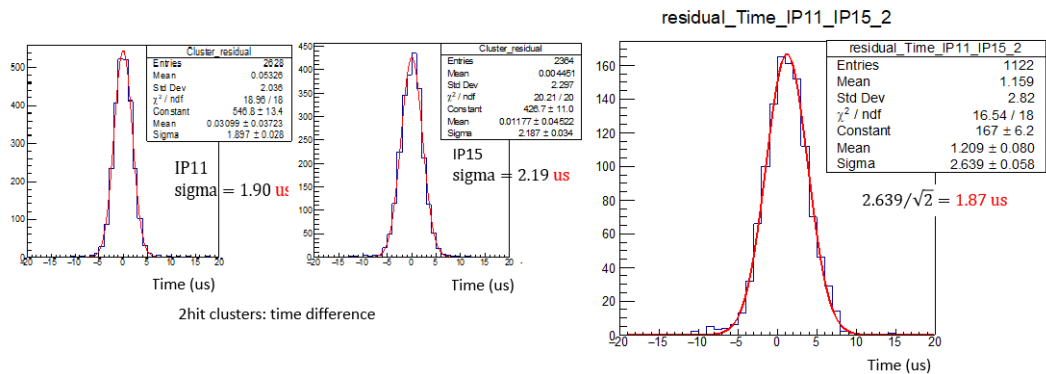


図 22: SOFIST 3 の時間分解能のピーム評価。2 ヒットクラスター内の時間差分布 (2 枚のセンサーそれぞれ) および 2 枚のセンサー間の時間差分布。

(3) SOFIST4

SOFIST3 と同じ機能を持ちピクセルサイズは $20 \mu\text{m}$ 角にした SOFIST4 をマイクロバンブを用いた 3 D 積層技術で実現した。図 23 に 3 D 積層の概念図と用いた金マイクロバンブの TEM 画像を示す。円筒形状の金マイクロバンブ (直径 $3 \mu\text{m}$) を上下チップの接続部に形成し圧縮接合する。上部チップからの信号は TBV を経て取り出すが、SOI での TBV は素子プロセス時に形成できるため微細加工が可能であり、TSV と比較してはるかに簡便に効率が良い。また、上部チップのシリコンはエッチングで除去するが埋め込み酸化膜がエッチングストッパーとして作用するので、この点でも SOI はこの 3 D 積層技術との親和性が高い。

試作された SOFIST4 は β 線を照射することで全ピクセルの応答を検査し、マイクロバンブによる接続不良は 0.02% であると評価できた。

SOFIST3 および SOFIST4 の開発に関しては、原が LCWS2019 国際会議で、村山 (M2) が HSTD12 国際会議でそれぞれが報告した。

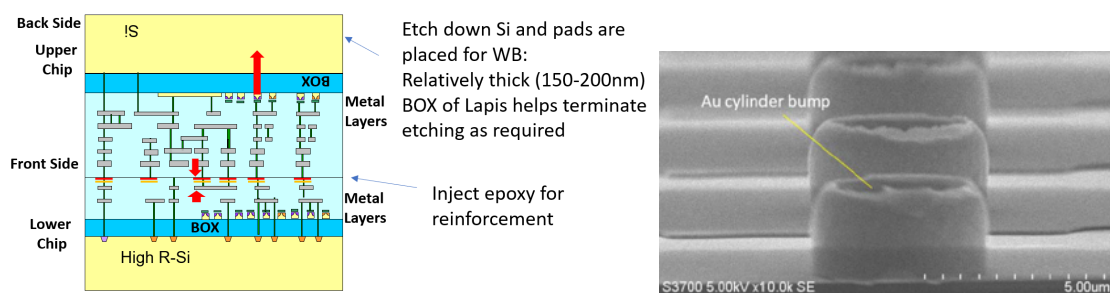


図 23: SOI による積層の概念。2 つのチップは接続部に金の円筒状マイクロバンブ (右図) をスッパタ形成した上で圧縮接合する。積層した上のチップのシリコン部はエッチングし除去する。埋め込み酸化膜を貫通したビア (TBV:through BOX via) に接続パッドを形成し信号を外部に取り出す。

【5】 福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミュオンによる観測

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視することが可能である（ミュオンラジオグラフィ法）。福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして、2011年夏からKEKのグループと共同で検出器の技術設計を開始しTIAの枠組みで研究を続けてきた。2017年度までに国際廃炉機構および東京電力の事業の下に1～3号機のすべての測定を完了した。

2019年には予備実験として東海村の原子炉で2011～2014年にかけて行った計測結果が、論文としてPTEPに掲載された。また、1号炉の観測結果（解け落ちて燃料装荷位置にはほとんど残っていない）もPTEPに投稿し受理された。

【6】 COBAND 実験

COBAND 実験は、筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同実験であり、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は 10^{12} 年であるが、これ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計画中的の実験である。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）とアルミニウム（ $\Delta = 0.172$ 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。

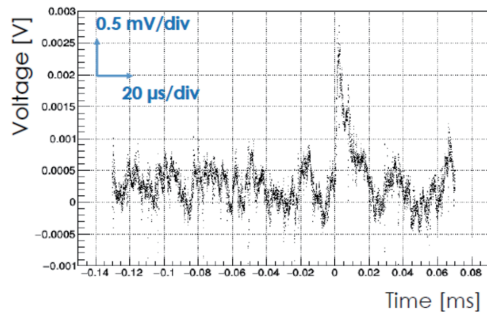


図 24: Nb/Al-STJ に可視光レーザーパルス（波長 465nm）を照射して得られた信号電荷を試作電荷積分型増幅器を用いて冷凍機内部で増幅した出力信号波形。増幅器は容量性負帰還を持つ差動増幅回路による低入力インピーダンス電荷積分型で SOI 技術を用いて製作され 350 mK で動作している。

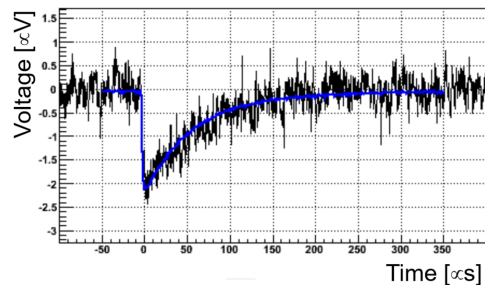


図 25: 200 μ m 角の Hf-STJ に冷凍機内で ^{55}Fe からの X 線を照射し得られた X 線単一光子に対する応答信号の波形。信号波形中の滑らかな曲線波形は、波高を得るために信号波形のフィットに用いられたテンプレート波形。

現在、産総研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 素子が得られている。しかしながら、STJ からの信号の読出しは (a) Nb/Al-STJ 素子の動作バイアス電圧は、0.4 mV 程度と非常に低電圧、(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 $250e$ (0.04 fC)、(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 10pF～nF と大きい、という理由により、冷凍機内の極低温ステージに設置する必要がある STJ からの生の信号をケーブルを介して読出す

ことは、極めてチャレンジングである。そこで、我々のグループでは信号読出し系として KEK、JAXA、静岡大等との共同研究により FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素子に直接取り付け極低温環境下で信号増幅をする。これまで、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いたコモンソース増幅回路で比較的簡単な増幅器の試作を行い、極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号に対し、同じ極低温ステージ上に設置して信号増幅に成功した。前述のように STJ 素子は比較的大きな静電容量を持つため、信号増幅には低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器が適している。そこで、新たに、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって低入力インピーダンスを実現する電荷積分増幅器を FD-SOI プロセスにより試作した。試作した電荷積分増幅器は、差動増幅回路部の開ループ利得が十分ではなく、加えて負帰還容量により得られる信号利得（入力電荷あたりの出力電荷）も足りずに単一光子信号を見るには至らなかった。しかし、STJ の大きな光パルス応答信号を冷凍機内で電荷積分増幅することに成功した（図 24）。室温で動作する回路がほぼそのまま極低温でも動作可能であることが実証されたので、今後は、より実用段階に近い増幅器回路の設計を進める。

Hf-STJ の開発においては、Hf 層の形成条件等を見直し 150 mK の温度において漏れ電流密度を約 $3 \text{ nA}/\mu\text{m}^2$ までの低減に成功している。このサンプルを用いて、韓国 IBS のグループとの共同研究により、 ^{55}Fe 線源からの X 線に対する応答測定を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて 50 mK 以下で行い、Hf-STJ として世界で初めて X 線域単一光子に対する応答信号を見ることに成功した（図 25）。

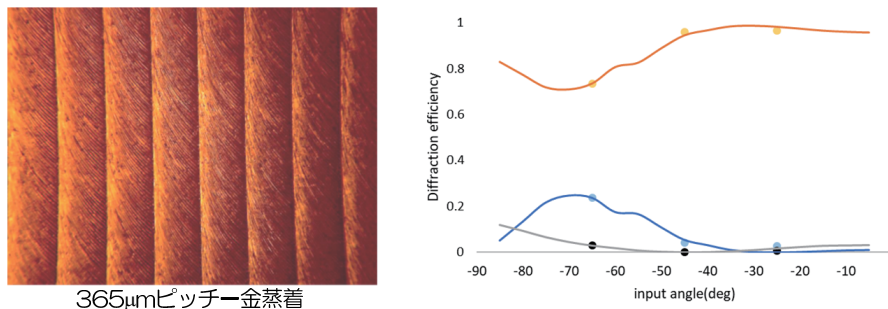


図 26: 精密金属加工により製作された $50 \mu\text{m}$ 域回折格子の写真 (左)。溝の間隔 $365 \mu\text{m}$ でアルミニウム板表面を加工し、金の薄膜が蒸着されている。福井大の遠赤外分子レーザー ($57.2 \mu\text{m}$, TM 偏光) で回折光 (0 次、1 次、2 次光) の相対強度比を実測してシミュレーション予測 (曲線) と比較した (右)。

Nb/Al-STJ 単体では、 25 meV の光子に対して必要なエネルギー分解能を達成できないが、単一光子検出が実現できれば、格子状に並べた 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 1 光子分光が可能となる。ロケット実験に向けて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光学系の開発も福井大、関西学院大等との共同研究により進められている。回折格子は、予想されるニュートリノ崩壊光の波長域 (約 $50 \mu\text{m}$) では商業的に手に入るものが存在しないため、波動光学シミュレーションに基づいた設計を行い、精密金属工作技術を持つ企業に製作させた。福井大の遠赤外線分子レーザーによる評価をおこない、回折効率の実測値がシミュレーションでの予想通りであり、回折格子実機の製作準備が整った (図 26)。また、望遠鏡の光学系の設計も進めており、他にも STJ 素子表面に施す反射防止膜、STJ 素子に光子を集めるウィンストーンコーンの検討も始まっている。

【7】 新規高性能シンチレータの開発

宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 探索実験などの、低エネルギー極稀事象探索のための新規無機シンチレータ結晶の開発を東北大学金属材料研究所と共同で行っている。暗黒物質のエネルギーは指数関数的に分布しており、どれだけ低いエネルギーまで観測出来るかが非常に重要になる。一方の $0\nu\beta\beta$ 探索実験では、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、どちらの事象も極めて稀なため、大量の標的を用意する必要がある。これらの問題を解決するためには、大発光量のシンチレータを開発することが一つの鍵となりうる。

二重ベータ崩壊を起こす可能性がある原子核は多くあるが、バックグラウンドのしみ込みを防ぐため反応のQ値を考慮すると、実験に適した原子核は ^{48}Ca , ^{96}Zr , ^{136}Xe 等、十数種類の特定の原子核に絞られる。そのため現在、組成としてこれらの二重ベータ崩壊核を含み、かつ大発光量の無機シンチレータの開発と性能評価を推進している。2019年度は、① ^{48}Ca を含むヨウ化カルシウム (CaI_2) と、② ^{160}Gd を含む $(\text{Ce, La, Gd})_2\text{Si}_2\text{O}_7$ の二種類のシンチレータに対して、バックグラウンド除去に重要な波形弁別能に焦点を当てて性能調査を行った。

(1) ヨウ化カルシウム (CaI_2) の波形弁別能の研究

ヨウ化カルシウム (CaI_2) 結晶は1964年に R. Hofstadter らによって発見されており、一般的に用いられる NaI(Tl) の2倍以上の発光量であることが知られている。しかし、当時の未熟な結晶育成・加工技術のせいで、一般に広まることなく技術が埋没してしまった。我々は、無機シンチレータの育成加工に高い実績を誇る東北大学金属材料研究所の吉川研究室と共同で、最新の装置と技術を駆使して CaI_2 結晶の育成・加工を行っている。

2017年度に作成した CaI_2 結晶で、 NaI(Tl) の2.7倍となる 107,000 ph./MeV を達成しており、2018年度から、その CaI_2 の波形弁別能力の調査を行っている。暗黒物質や二重ベータ崩壊の探索実験においては、低バックグラウンド環境が極めて重要である。無機シンチレータでは粒子毎の波形の違いを用いた波形弁別法によって信号とバックグラウンドを分離して、低バックグラウンド環境を実現する方法が一般的に用いられる。作製した結晶を湿度3%以下のドライルーム内で $5\times 5\times 1$ mm 程度のサイズに切り出し、光電子増倍管で光信号を読みだした。アルファ線源として ^{241}Am 、ガンマ線源として ^{137}Cs を用いて、その波形を 400 MHz サンプリングレートの Waveform digitizer で取得し、データ解析を行い比較した。

それぞれ1万事象のデータを取得し、平均波形を作成したものを図27左に示す。波形の最初 200 ns に大きな違いがみられる一方で、波形後半はほとんど変わらないことが分かった。事象ごとの波形の違いを定量化するために、波形前半 200 ns と全体の比を取った Ratio というパラメータを定義した。各事象の Ratio を縦軸に取り、横軸をエネルギーとした2次元プロットを図27右に示す。赤がアルファ線、青がガンマ線のものである。100 keV 以上の領域で、きれいに分布が分かれていることが見て取れる。また、図27右の緑は潮解した結晶にアルファ線を照射した場合のデータで、赤の潮解していないアルファ線と比べると、Ratio の値はほぼ同じであることが分かった。つまり、潮解によって発光量は減っても波形に変化はないということが示され、アルファ線とガンマ線の波形の違いは、純粋に粒子種の違いから来ていることを明らかにした。

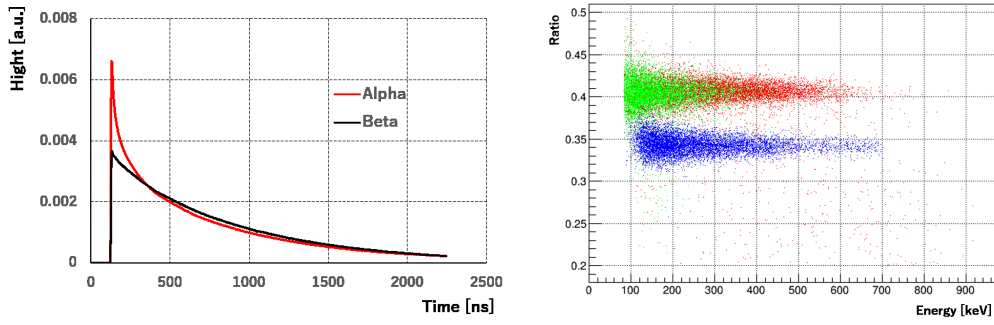


図 27: (左) CaI_2 結晶にアルファ線 (赤) とガンマ線 (黒) を照射した際の平均波形。(右) 横軸エネルギー、縦軸が Ratio の 2 次元プロット。青がガンマ線、赤がアルファ線、黄緑は潮解した結晶にアルファ線を当てたときのもの。

(2) Ce:La-GPS の波形弁別能の研究

$(\text{Ce},\text{La},\text{Gd})_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (Ce:La-GPS) は、比較的新しい酸化物結晶のシンチレータである。3~4 万 ph./MeV という高い発光量に加え、発光波長が光電子増倍管の感度波長と一致すること、潮解性が無く扱いやすいこと、高温でも発光量が落ちないこと等の優れた特性を持ち注目を集めている。金属材料研究所において、La-GPS 結晶 (10 mm 角) をチョコラルスキー法で作成し、光電子増倍管 (Hamamatsu R9869) の光電面に光学グリースで接着し、外から ^{241}Am と ^{137}Cs の線源を用いてアルファ線とガンマ線を照射した。波形情報はオシロスコープ (HDO6140 Teledyne LeCroy) を用いて 2.5 GHz のサンプリングレートで、それぞれ約 1 万事象ずつ取得した。

図 28 左はそれぞれのデータから 0.5~0.8 MeV の事象を選んで平均波形を作ったものであり、図の中の式は、アルファ線とガンマ線の平均波形を 2 つの指数関数でフィットした結果である。高速成分と低速成分の時定数は粒子ごとに変化しないが、それらの比率は変化することが示された。次に波形弁別能を評価するため、Ratio よりも分離が良い、以下の Shape Indicator (SI) という手法を導入した。

$$SI = \frac{\sum_i P(t_i) f(t_i)}{\sum_i f(t_i)}, \quad P(t_i) = \frac{f_\alpha(t_i) - f_\gamma(t_i)}{f_\alpha(t_i) + f_\gamma(t_i)} \quad (1)$$

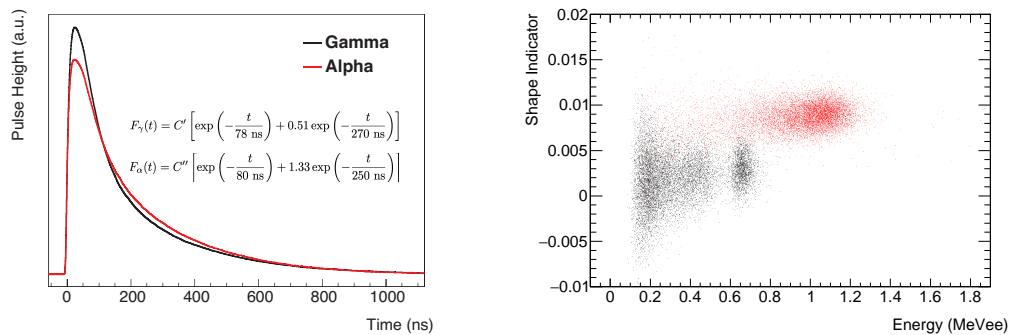


図 28: (左) Ce:La-GPS で得られた平均波形とそのフィット結果。赤がアルファ線、黒がガンマ線のデータから得られたもの。(右) 横軸エネルギー、縦軸が SI の 2 次元プロット。赤がアルファ線、黒がガンマ線である。

ここで、 $f(t_i)$ は得られた事象の波形データ、 $f_\alpha(t_i)$ はアルファ事象の平均波形、 $f_\gamma(t_i)$ はガンマ事象の平均波形である。図 28 右は横軸をエネルギー、縦軸を SI の値としてプロットしたもので、赤がアルファ線、黒がガンマ線である。200 keV 以上のエネルギー領域では分離出来ていることが分かる。SI < 0.0057 でカットをかけた場合、ガンマ線が 96.3 % 残るのに対して、アルファ線を 3.7 % まで減らすことが出来る。この結果から、Ce:La-GPS が高い波形弁別特性を持つシンチレータであることが示された。

〈 競争的資金 〉

1. 科学研究費 新学術領域研究「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHC による真空と時空構造の解明～」、2016 - 2020 年度、計画研究 B01 : 「ヒッグス粒子で探る真空と世代構造」, 研究分担者 : 受川史彦 8,190 千円 (直接経費 5,300 千円, 間接経費 1,890 千円) (20189 年度)
2. 科学研究費 基盤研究 (B) 「高時間分解能を併せもつ高位置分解能 4 次元半導体検出器の実現」, 2019 - 2022 年度, 研究代表者 : 原和彦, 5,590 千円 (直接経費 4,300 千円, 間接経費 1,290 千円) (2019 年度)
3. 科学研究費 基盤研究 (B) 「大発光量無機シンチレータで目指す宇宙史研究」, 2018 - 2020 年度, 研究代表者 : 飯田崇史, 5,720 千円 (直接経費 4,400 千円, 間接経費 1,320 千円) (2019 年度)
4. 科学研究費 挑戦的研究 (萌芽) 「ハフニウム超伝導体を用いた究極の感度を持つ超伝導検出器への挑戦」, 2018 - 2019 年度, 研究代表者 : 飯田崇史, 3,120 千円 (直接経費 2,400 千円, 間接経費 720 千円) (2019 年度)
5. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「フッ素系界面活性剤による透明な水シンチレータの実現」, 2019 - 2020 年度, 研究代表者 : 飯田崇史, 2,210 千円 (直接経費: 1,700 千円, 間接経費: 510 千円) (2019 年度)
6. 筑波大学 研究基盤支援プログラム S タイプ 「無機シンチレータを用いた地下素粒子実験による宇宙史解明への挑戦」, 2017 - 2019 年度, 研究代表者 : 飯田崇史, 980 千円 (直接経費 980 千円) (2019 年度)
7. TIA かけはし 「3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」, 2019 年度, 研究分担者 : 原和彦, 150 千円 (2019 年度)

〈 受賞 〉

1. CDF and D0 collaborations, The 2019 High Energy and Particle Physics Prize for the discovery of the top quark and the detailed measurement of its properties (EPS High Energy and Particle Physics Division)
2. 金 信弘、金萬有 学術賞、「2TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップクォークの発見、Bc 中間子の発見、および Bs 中間子の粒子反粒子振動の初観測をはじめとする素粒子物理の研究」 2019 年 5 月 11 日

〈 論文 〉

(査読論文)

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Search for Higgs-like particles produced in association with bottom quarks in proton-antiproton collisions,” *Phys. Rev. D* **99**, no.5, 052001 (2019).
2. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential and double-differential cross-sections in the ℓ +jets channel with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.12, 1028 (2019).
3. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of angular and momentum distributions of charged particles within and around jets in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **100**, no.6, 064901 (2019).
4. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom-squark pair production with the ATLAS detector in final states containing Higgs bosons, b -jets and missing transverse momentum,” *JHEP* **12**, 060 (2019).
5. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated-photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 36 fb^{-1} of ATLAS data,” *JHEP* **10**, 203 (2019).
6. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015–2017 LHC proton-proton collision data,” *JINST* **14**, no.12, P12006 (2019).
7. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of K_S^0 and Λ^0 production in $t\bar{t}$ dileptonic events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.12, 1017 (2019).
8. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.11, 935 (2019).
9. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-section for the production of jets in association with a Z boson in proton-proton collisions at 8 TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.10, 847 (2019).
10. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS b-jet identification performance and efficiency measurement

with $t\bar{t}$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.11, 970 (2019).

11. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of flow harmonics correlations with mean transverse momentum in lead-lead and proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.12, 985 (2019).
12. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^{\pm} -boson and Z-boson production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.11, 901 (2019).
13. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Resolution of the ATLAS muon spectrometer monitored drift tubes in LHC Run 2,” *JINST* **14**, no.09, P09011 (2019).
14. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of boosted Higgs bosons decaying into b -quark pairs with the ATLAS detector at 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.10, 836 (2019).
15. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **100**, no.5, 052011 (2019).
16. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 091 (2019).
17. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy charged boson in events with a charged lepton and missing transverse momentum from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, no.5, 052013 (2019).
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of electroweak production of a same-sign W boson pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, no.16, 161801 (2019).
19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for excited electrons singly produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.9, 803 (2019).
20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral leptons in decays of W bosons produced in 13 TeV pp collisions using prompt and displaced signatures with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 265 (2019).

21. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z -boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.8, 666 (2019).
22. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **100**, no.3, 032007 (2019).
23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of ZZ production in the $\ell\ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **10**, 127 (2019).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial and differential W^+W^- production cross-sections at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.10, 884 (2019).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Modelling radiation damage to pixel sensors in the ATLAS detector,” *JINST* **14**, no.06, P06012 (2019).
26. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top-quark mass in $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **11**, 150 (2019).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a right-handed gauge boson decaying into a high-momentum heavy neutrino and a charged lepton in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **798**, 134942 (2019).
28. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section and charge asymmetry of W bosons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.9, 760 (2019).
29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, no.23, 231801 (2019).
30. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of light-by-light scattering in ultraperipheral Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, no.5, 052001 (2019).
31. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vectorbosons in pp collisions with the ATLAS detector,” *PoS DIS2019*, 135 (2019).

32. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the production of three massive vector bosons with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **798**, 134913 (2019).
33. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section for a Higgs boson in association with a vector boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **798**, 134949 (2019).
34. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb^{-1} of pp collision data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **796**, 68-87 (2019).
35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of VH , $H \rightarrow b\bar{b}$ production as a function of the vector-boson transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 141 (2019).
36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet-substructure observables in top quark, W boson and light jet production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **08**, 033 (2019).
37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of prompt photon production in $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV $p+\text{Pb}$ collisions with ATLAS,” *Phys. Lett. B* **796**, 230-252 (2019).
38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected by the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 142 (2019).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles decaying into a top-quark pair in the fully hadronic final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, no.9, 092004 (2019).
40. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison of Fragmentation Functions for Jets Dominated by Light Quarks and Gluons from pp and $\text{Pb}+\text{Pb}$ Collisions in ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **123**, no.4, 042001 (2019).
41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for third-generation scalar leptoquarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 144 (2019).

42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS], “Combinations of single-top-quark production cross-section measurements and $-\text{f}_{LV}V_{tb}$ — determinations at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments,” JHEP **05**, 088 (2019).
43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the four-lepton invariant mass spectrum in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” JHEP **04**, 048 (2019).
44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $W^{\pm}Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **79**, no.6, 535 (2019).
45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **79**, no.8, 639 (2019).
46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS calorimeter,” Eur. Phys. J. C **79**, no.6, 481 (2019).
47. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy charged long-lived particles in the ATLAS detector in 36.1 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **99**, no.9, 092007 (2019).
48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton-dijet events in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **79**, no.9, 733 (2019).
49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass resonances decaying into two jets and produced in association with a photon using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **795**, 56-75 (2019).
50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet azimuthal correlations and conditional yields in pp and $p+\text{Pb}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02\text{TeV}$ with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **100**, no.3, 034903 (2019).
51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ratio of cross sections for inclusive isolated-

photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ and 8 TeV with the ATLAS detector,” JHEP **04**, 093 (2019).

52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar resonances decaying into $\mu^+\mu^-$ in events with and without b -tagged jets produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **07**, 117 (2019).
53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, no.7, 072009 (2019).
54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-quark decays $t \rightarrow Hq$ with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **05**, 123 (2019).
55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation 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,” Phys. Lett. B **793**, 469-492 (2019).
56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for large missing transverse momentum in association with one top-quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **05**, 041 (2019).
57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Properties of $g \rightarrow b\bar{b}$ at small opening angles in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **99**, no.5, 052004 (2019).
58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino and neutralino production in final states with a Higgs boson and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **100**, no.1, 012006 (2019).
59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **05**, 164 (2019).
60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 2015–2016 LHC proton-proton collision data,” JINST **14**, no.03, P03017 (2019).
61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived multicharged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **99**, no.5, 052003 (2019).

62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 098 (2019).
63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV in ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.5, 382 (2019).
64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}$ production with additional heavy-flavour jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 046 (2019).
65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $WW^{(*)}WW^{(*)}$ decay channel using ATLAS data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **05**, 124 (2019).
66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the hard double-parton scattering contribution to inclusive four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett.* **790**, 595 (2019).
67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of τ -leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, 072001 (2019).
68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer,” *Phys. Rev. D* **99**, no.5, 052005 (2019).
69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}WW^*$ decay mode at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 092 (2019).
70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Production of a Long-Lived Neutral Particle Decaying within the ATLAS Hadronic Calorimeter in Association with a Z Boson from pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, no.15, 151801 (2019).
71. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for four-top-quark production in the single-lepton and opposite-sign dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, no.5, 052009 (2019).

72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of W and Z boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.2, 128 (2019).
73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run 2 data collected in 2015 and 2016,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.3, 205 (2019).
74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$ channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data and combination with previous results,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.4, 290 (2019).
75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, 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 two charged leptons and two jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 016 (2019).
76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of photon-jet transverse momentum correlations in 5.02 TeV Pb + Pb and pp collisions with ATLAS,” *Phys. Lett. B* **789**, 167-190 (2019).
77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible Higgs boson decays in vector boson fusion at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **793**, 499-519 (2019).
78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for pairs of highly collimated photon-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, no.1, 012008 (2019).
79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **789**, 508-529 (2019).
80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of top-quark and W -boson tagging with ATLAS in Run 2 of the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.5, 375 (2019).
81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with hadronically decaying τ -leptons, jets, and missing transverse momentum using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, no.1, 012009 (2019).

82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy charged long-lived particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using an ionisation measurement with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **788**, 96-116 (2019).
83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived particles in final states with displaced dimuon vertices in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **99**, no.1, 012001 (2019).
84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged scalar bosons decaying into same-sign W boson pairs with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.1, 58 (2019).
85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, 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 in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no.19, 191801 (2018)
86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for vector-boson resonances decaying to a top quark and bottom quark in the lepton plus jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **788**, 347-370 (2019).
87. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “In situ calibration of large-radius jet energy and mass in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.2, 135 (2019).
88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A strategy for a general search for new phenomena using data-derived signal regions and its application within the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **79**, no.2, 120 (2019).
89. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Correlated long-range mixed-harmonic fluctuations measured in pp , p +Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **789**, 444-471 (2019).
90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into a pair of light bosons in the $b\bar{b}\mu\mu$ final state in pp collision at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **790**, 1-21 (2019).
91. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the nuclear modification factor for inclusive jets in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **790**, 108-128 (2019).

92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **01**, 030 (2019).
93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light resonances decaying to boosted quark pairs and produced in association with a photon or a jet in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **788**, 316-335 (2019).
94. H. Fujii, K. Hara, S.H. Kim *et al.*, “Imaging the inner structure of a nuclear reactor by cosmic muon radiography”, PTEP Vol. 2019, Issue 5, (2019) 053C01.
95. S. Wada, K. Hara *et al.*, “Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector”, PoS(Vertex2019) 057.
96. K. Hara *et al.*, “Radiation hardness of silicon-on-insulator pixel devices”, Nucl. Instr. Meth. A924 p426-430 (2019). .
97. K. Nakamura, K. Hara *et al.*, “Development of a radiation tolerant fine pitch planar pixel detector by HPK/KEK”, Nucl. Instr. Meth. A924 p64-68 (2019). .
98. T. Tsuboyama, K. Hara *et al.*, “R&D status of SOI-based pixel detector with 3D stacking readout”, Nucl. Instr. Meth. A924 p422-425 (2019).
99. S. Ono, K. Hara *et al.*, “Development of a monolithic pixel sensor based on SOI technology for the ILC vertex detector”, Nucl. Instr. Meth. A924 p431-435 (2019).
100. S. Wada, K. Hara *et al.*, “Evaluation of characteristics of Hamamatsu low-gain avalanche detectors”, Nucl. Instr. Meth. A924 p480-486 (2019).
101. I. Kurachi, K. Hara *et al.*, “Investigation of radiation hardness improvement by applying back-gate bias for FD-SOI MOSFETs”, Nucl. Instr. Meth. A924 p404-408 (2019).
102. C. Lacasta, K. Hara *et al.*, “Design of the first full size ATLAS ITk strip sensor for the endcap region”, Nucl. Instr. Meth. A924 pp131-141 (2019).
103. A. J. Blue, K. Hara *et al.*, “Test beam evaluation of silicon strip modules for ATLAS phase-II strip tracker upgrade”, Nucl. Instr. Meth. A924 p108-111 (2019).
104. V. Cindro, K. Hara *et al.*, “Measurement of the charge collection in irradiated miniature sensors for the upgrade of the ATLAS phase-II strip tracker”, Nucl. Instr. Meth. A924 p153-159 (2019).
105. R. F. H. Hunter, K. Hara *et al.*, “First bulk and surface results for the ATLAS ITk Strip stereo annulus sensorsr”, Nucl. Instr. Meth. A924 p142-146 (2019).

106. S. H. Kim, Y. Takeuchi, T. Iida, C. Asano, R. Wakasa, T. Yoshida, S. B. Kim *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Far-Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND experiment”, PoS ICHEP2018 (2019) 427.
107. K. Tetsuno, T. Iida, *et al.*, “Status of ^{48}Ca double beta decay search and its future prospect in CANDLES ” ,
Journal of Physics: Conference Series/1468/p.012132 (2020).
108. K. Fushimi, T. Iida, *et al.*, “PICOLON dark matter search Development of highly redio-pure NaI(Tl) scintillator ” ,
Journal of Physics Conference Series/1468/p.012057 (2020).
109. S. Umehara, T. Iida, *et al.*, “Neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca studied by CaF₂(pure) scintillators” ,
Journal of Physics: Conference Series/1342/p.012049 (2020).
110. K. Kamada, T. Iida, *et al.*, “Crystal growth and scintillation properties of Eu-doped Ca(BrxI_{1-x})₂ crystals” ,
Radiation Measurements Vol. 127 106139 (2019).
111. K. Mizukoshi, T. Iida, *et al.*, “Pulse-shape discrimination potential of new scintillator material: La-GPS:Ce” ,
Journal of Instrumentation/14 P06037 (2019).
112. 飯田崇史 *et al.*, “二重ベータ崩壊探索実験のための新規シンチレータ開発” ,
Radiation detectors and their uses : proceedings of the 33rd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, pp.42-50 (2019).
113. K. Ueno and T. Iida, “Single Electron Generation and Its Imaging and Counting Using Microchannel plate” ,
2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), pp. 1-3, (2019).
114. Y. Kibe and T. Iida, “Development of ^6Li -loaded water-based liquid scintillator for the detection of secondary neutrons in proton therapy” ,
2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), pp. 1-4, (2019).

(査読なし論文)

1. S.H. Kim *et al.* (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 2019 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2019 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/933690> SA6000142016, II-1 (2019), (Online edition).

〈 学会発表 〉

(国内)

1. 佐藤構二：LHC ATLAS 実験,
宇宙史研究センター 2019 年度第 1 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 6 月 3 日), 筑波大学.
2. 武内勇司：COBAND 実験に向けた STJ+SOI アンプ開発現状と sub-GeV 領域ダークマター粒子探索への応用,
宇宙史研究センター 2019 年度第 1 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 6 月 3 日), 筑波大学.
3. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,
ISAS 観測ロケットシンポジウム (2019 年 8 月 5-6 日), JAXA/ISAS.
4. 大鳴匡史：内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) に関する基礎研究,
日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
5. 村山仁志：精密な位置・時間計測が可能な SOI ピクセルセンサー SOFIST の研究開発,
日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
6. 原田大豪：ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器の性能評価,
日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
7. 笠島誠嘉：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 X,
日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
8. 飯田崇史：「宇宙史研究のための CaI2 シンチレータ開発の現状 III ~波形弁別能の研究~」,
日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 17-20 日), 山形大学小白川キャンパス.
9. 武内勇司ビッグバン数秒後の残照に標準理論の綻びを探る COBAND 計画,
筑波大学数理物質研究科物理学セミナー (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学.
10. 村山仁志、岩波四季恵：SOI pixel detector development,
第 2 回量子線イメージング研究会 (2019 年 9 月 25-26 日), 姫路市.
11. 原和彦：ミュオンラジオグラフィによる福島第一原発の燃料デブリの観測,
SMART2019, (2019 年 11 月 18-19 日), 松江市. .
12. 原和彦：SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC,
宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学.
13. 武内勇司：COBAND 実験 最近の進展：IBS/CUP での Hf-STJ 測定,
宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学.
14. 佐藤構二：ATLAS 実験の最近の物理結果から,
宇宙史研究センター 2019 年度第 2 回構成員会議・成果報告会 (2019 年 11 月 21 日), 筑波大学.

15. 若狭玲那 : Hit efficiency Study,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
16. 山内大輝 : Development of Performance Analysis Tool,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
17. 和田冴 : SCT IV scan 解析,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
18. 原和彦 : Strip Sensor QCQA in Japan,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
19. 谷野恭介 : ATLAS 検出器増強に向けた新型 ASIC 搭載による pixel sensor module の性能評価,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
20. 佐藤勝哉 : Bump bond 高抵抗問題,
ATLAS-Japan Silicon Workshop (2019 年 12 月 19-20 日), 東京工業大学.
21. 飯田崇史 : 次世代地下素粒子実験に向けた新規シンチレータ開発の現状,
KEK 測定器開発プラットフォーム A 班研究会 (2019 年 12 月 23-24 日), 東京大学本郷キャンパス (一般公演).
22. 原和彦 : 素粒子実験用 SOFIST ピクセルセンサーの 3 D 積層,
第 4 回 3 次元積層半導体量子イメージセンサ研究会 (2020 年 1 月 27 日), エポカル、つくば市.
23. 前川群 : COBAND 実験のための光学系設計開発 III,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス).
24. 大鳴匡史 : 内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) のベータ線による時間分解能測定システムの開発,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス)..
25. 村山仁志 : ILC 崩壊点検出器としての位置・時間計測が可能な SOI ピクセル検出器 SOFIST の性能評価,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス)..
26. 佐藤勝哉 : LHC 高輝度化に向けた ATLAS 検出器アップグレードのため RD53A ASIC を搭載したピクセル検出器の性能評価,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス).
27. 谷野恭介 : ATLAS 検出器アップグレードに向けた新型 ASIC を用いたバイアスレベル起因のノイズ評価,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス).
28. 原田大豪 : HL-LHC ATLAS ピクセル検出器性能評価のためのテストビーム飛跡システムの開発,
日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日), 名古屋大学 (東山キャンパス).

29. 廣瀬茂輝：LHC-Run2 全データでのヒッグス粒子足新結果と Run3 準備状況，日本物理学会第 75 回年次大会（2020 年 3 月 16–19 日），名古屋大学（東山キャンパス）（企画講演）。

(国際会議・研究会)

1. K. Hara *et al.*, “Looking for dark-sector long-lived particles with ATLAS”, 2019 Joint Workshop of FKPPL and TYL/FJPPL, May 8–10, 2019, Jeju, Korea. ,
2. K. Hara, “Poster Session Summary Talk”, 27th International Workshop on Vertex Detectors (Vertex 2019), Oct 12–18, 2019, Lapud, Croatia.
3. S. Wada *et al.*, (Poster presentation) “Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector”, 27th International Workshop on Vertex Detectors (Vertex 2019), Oct 12–18, 2019, Lapud, Croatia.
4. K. Hara *et al.*, “Charge Collection of the ATLAS ITk Prototype Silicon Strip Sensors ATLAS17LS for the HL-LHC”, 12th International “Hisroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12), Dec 14–18, 2019, Hiroshima, Japan.
5. K. Sato *et al.*, “Characterization of Si Sensors irradiated up to $1e17/cm^2$ ”, 12th International “Hisroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12), Dec 14–18, 2019, Hiroshima, Japan.
6. K. Onaru *et al.*, (Poster presentation) “LGAD detector timing measurement and simulation for fine segmentation”, 12th International “Hisroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12), Dec 14–18, 2019, Hiroshima, Japan.
7. H. Murayama *et al.*, (Poster presentation) “SOIFST SOI pixel detector for the ILC”, 12th International “Hisroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12), Dec 14–18, 2019, Hiroshima, Japan.
8. K. Hara *et al.*, “SOFIST, an SOI based pixel sensor for the ILC”, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2019), Oct 29–Nov. 1, 2019, Sendai, Japan.
9. C. Asano *et al.*, (Poster presentation) “R&D of Hf-STJ for COBAND experiment”, 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18), Jul. 22–26, 2019, Milan, Italy.
10. A. Kasajima *et al.*, (Poster presentation) “Development of superconducting tunnel junction detector with cryogenic amplifier for COBAND experiment” 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18), July. 22–26, 2019, Milan, Italy.

11. T. Iida *et al.*, 「R&D of new high-performance scintillators including double beta decay nuclei (Poster presentation)」, 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, Oct. 26 - Nov. 2, 2019.
12. T. Iida *et al.*, 「Development of water scintillator for a future large-scale neutrino experiment (Poster presentation)」, 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, Oct. 26 - Nov. 2, 2019.
13. T. Iida *et al.*, 「Development of calcium iodide (CaI₂) scintillator for the study of double beta decay of ⁴⁸Ca (Oral presentation)」, 15th International Conference on Scintillating Materials and their Applications (SCINT2019), Sendai, Japan, Sep. 30 - Oct. 4, 2019.

〈 学位論文 〉

(修士論文)

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2020 年 2 月

1. 安部竜平 「PDD 構造をもった SOI 検出器の放射線損傷」
2. 岩波四季恵 「大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器 INTPIX7 を用いたビーム飛跡検出のための開発研究」
3. 大鳴匡至 「4次元検出器開発に向けた内部増幅機能つき半導体検出器 LGAD の時間分解能に関する研究」
4. 笠島誠嘉 「COBAND 実験における単一光子検出を目指した STJ 信号の極低温電荷積分型増幅器の開発研究」
5. 原田大豪 「RD53A を搭載した HL-LHC 用 ATLAS ピクセル検出器の閾値およびテストビームによるクロストークの研究」
6. 村山仁志 「ILC 崩壊点検出器としての位置・時間計測が可能な SOI ピクセル検出器 SOFIST の性能評価」
7. 渡辺圭敏 「SOI-MOSFET 検出器における BOX 電荷自動補正回路の放射線耐性の評価」