

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
特命教授	金 信弘
教授	Soo-Bong KIM (海外教育研究ユニット招致)
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	13名
学群4年次生	3名

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

【1】 LHC ATLAS 実験

欧州素粒子研究機構 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。本研究室では、LHC でデータを取得している ATLAS 実験に参加して来た。LHC で陽子陽子衝突を測定している ATLAS と CMS 両実験は、2012 年にヒッグス粒子を発見した。その後も LHC 加速器は運転を続け、ヒッグス粒子や標準理論の精密測定、新物理の探索などさまざまな素粒子物理の研究を続けて来た。今後も、加速器と検出器をアップグレードしながら 2030 年代半ばまで稼働を続け、より高い精度での素粒子研究を行う。

2020 年度には、LHC 加速器と ATLAS 実験はアップグレードのためのシャットダウン中であつた。これまでに得られているデータを用いた様々な物理解析が進行中である。ここではヒッグス粒子の精密測定、2 個のヒッグス粒子が同時に生成される物理過程の探索、標準理論を超えるヒッグス粒子の探索に絞って、物理解析の現状をまとめる。筑波大学グループは、現行のシリコントリップ検出器の運転に大きな貢献をし、また 2027 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発・建設も行っている。

(1) LHC-ATLAS 実験の状況と将来計画

2011-2012 年の Run-1 実験では、重心系エネルギー 7 ~ 8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。Run-1 後も LHC は、2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年から 2018 年の Run-2 実験では、重心系エネルギーを 13 TeV に上げて衝突実験を行った。Run-1 では 7 TeV、8 TeV のデータをそれぞれ 4.57 fb^{-1} 、 20.3 fb^{-1} 、Run-2 では 13 TeV のデータを 4.57 fb^{-1} 取得した。

2019年からは、加速器と検出器のアップグレードのためのシャットダウンを行っている。今回のシャットダウンで、ATLAS実験では、加速器での瞬間ルミノシティの増強に伴うバックグラウンド・レートの増加に対応するためのトリガーのアップグレードを行っている。バックグラウンドとなるQCDジェットをいままで以上に効率よく排除しながら電子とミュオンにトリガーをかけるために、主として、カロリメータ・トリガー用電子回路と、超前方のミュオン・トリガー検出器のアップグレードをする。

今後は、2022-2024年にRun-3実験を行い、重心系エネルギー13～14 TeVでさらに 300 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2025-2026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、2027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。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。

2020年度には、COVID-19感染症の世界的な流行が発生し、研究者の海外渡航が各国政府により制限された。CERNでも研究者の入構を制限するなどの感染防止対策が取られた。この影響により、アップグレード・ワークに遅延が生じた。Run-3実験はもともと2021年から開始の予定だったが、当初予定より1年間開始を延期し2022年に開始することに、2020年夏に決定した。

(2) ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、ATLASおよびCMS両実験により、2012年に発見された。LHC実験での重要なテーマのひとつは、発見したヒッグス粒子の性質を詳しく測定し、標準理論を厳しく検証することである。

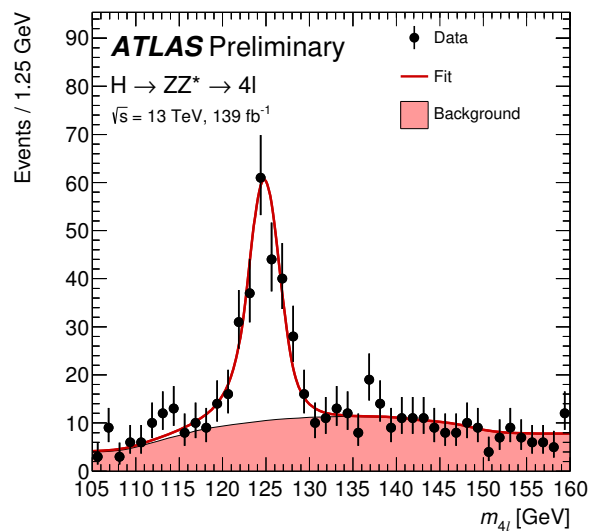


図 1: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 崩壊チャンネルでの4つのレプトンの不変質量の分布。フィットの結果が赤線で示されている。赤く塗った領域は、バックグラウンドの寄与を表している。

ATLAS実験では、ヒッグス粒子の質量も、データの増加とともに精度を上げて測定を更新している。2018年には、Run-2の 36 fb^{-1} のデータをRun-1の全データと合わせ、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ および $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ の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 GeV/c² と測定されていた。2020 年春には、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 $124.92_{-0.20}^{+0.21}$ GeV/c² と測定された。図 1 にこの解析での不変質量分布を示す。

ヒッグス粒子の重要な性質は、フェルミオンとの湯川結合の強さが、フェルミオン質量に比例すると標準理論で予言されていることである。また、標準理論によると、ゲージ粒子は、電弱対称性が破れる際に質量を獲得したのであり、そのヒッグス粒子との結合が標準理論通りであるかどうかを検証することは意義深い。これら標準理論の粒子とヒッグス粒子の結合は、ヒッグス粒子のさまざまな生成・崩壊過程の頻度を測定することで検証する。ヒッグス粒子事象の頻度は、生成断面積と崩壊分岐比の積として測定されるが、LHC ではこの測定量の標準理論による予言値との比を信号強度と呼ぶ。

ヒッグス粒子がゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$ 、 $H \rightarrow WW^*$ の崩壊およびトップクォークのループ・ダイアグラムを介する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、Run-1 データの詳細な解析により確認されていた。同じく Run-1 のデータ解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊も ATLAS と CMS 両実験の複合結果で観測されたことで、Run-2 がはじまる前にはヒッグス粒子がフェルミオンと結合することが確認された。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、ヒッグス粒子がトップクォーク対と同時に生成される過程がそれぞれ観測された。これらによりヒッグス粒子がクォークとも湯川結合することが確認された。同時に、LHC では測定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。

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。2020 年に ATLAS 実験では、139 fb⁻¹ のデータを用いた $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析を公表した。

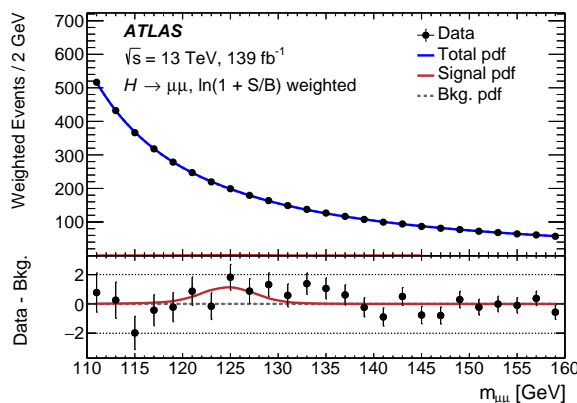


図 2: $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析での 2 つの μ 粒子の不変質量分布。フィットで得られた信号とバックグラウンドの寄与を S と B とし、候補事象に $\ln(1 + S/B)$ 重みをかけてヒストグラムにした。下部パネルは、分布からバックグラウンドの寄与を差し引いた図である。

この解析では、 $t\bar{t}H$ 、 VH 、グルーオン融合、ベクトル・ボソン融合の 4 つのヒッグス粒子生成過程を個別に解析し、最後に統一的に統計解釈することで解析感度を最適化した。図 2 に、すべての生成過程の解析チャンネルを複合した 2 つの μ 粒子の不変質量分布を示す。信号強度 μ は、 $\mu = 1.2 \pm 0.6$ と測定され、 $H \rightarrow \mu\mu$ 信号の有意度は 2σ であった。また、標準理論の予言値の 2.2 倍より大きい信号強度を 95% の信頼度で棄却した。 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程は、CMS 実験でも 2020 年に探索結果を公表し、 3σ の有意度で信号の兆候が確認され

たと報告している。Run-3でデータを増やし、測定精度を向上していくことが重要である。

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の粒子の間の結合の強さを測定することができる。2020年度には、 139 fb^{-1} のデータを用いた複合測定による結合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重要な物理パラメータを解析した。図3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に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と崩壊過程の組み合わせに対して、信号強度を測定した結果である。信号強度は生成断面積と崩壊分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した量と定義しているため、標準理論の予言値は図中では1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測定した結果である。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。解析に使用できるデータ量が増加したこ

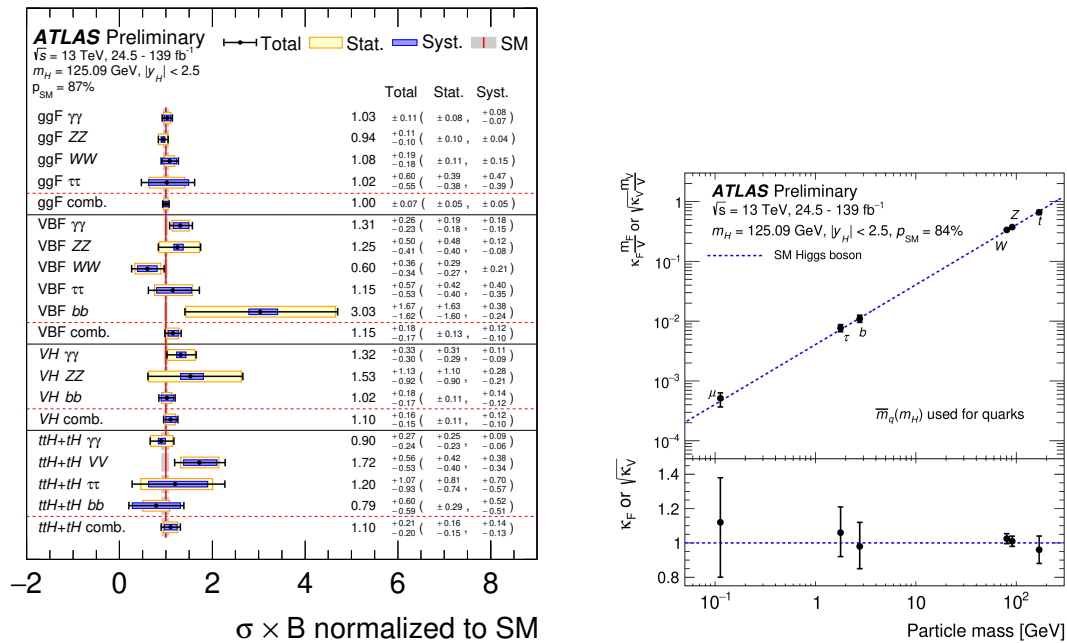


図 3: ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して測定された信号強度。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

とで、いままでよりも詳しくヒッグス粒子の生成過程を測定できるようになってきている。ヒッグス粒子の生成過程をいくつかの運動学的な領域に分割し、それぞれの領域での生成断面積を、さまざまなヒッグス粒子の崩壊過程での測定を同時にフィットすることで測定した結果が図4である。運動学的な領域の分割は、多くの場合ヒッグス粒子または随伴する粒子の運動量によって定義している。結果は、標準理論の予言とよく一致している。

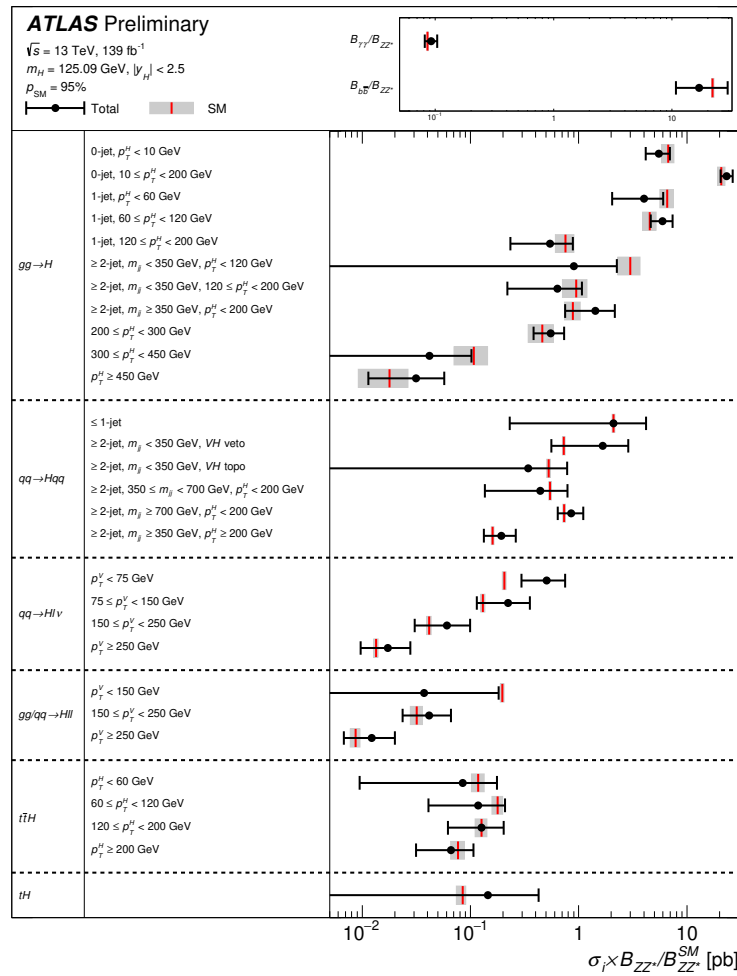


図 4: ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

(3) ヒッグス粒子が2個同時に生成される過程の探索

ヒッグス粒子が2つ同時に生成される事象は、LHCでは図5に示す生成過程が考えられる。標準理論通りであれば左と中の2つの過程が混ざりあって生成するが、こうした事象を発見し精密に測定することでヒッグス粒子の自己相互作用を測定できる。一方で、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、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6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、標準理論が预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データを使ってアップデートしている。2020年には、139 fb⁻¹のデータを用いて $HH \rightarrow bbWW \rightarrow bbl\nu\nu$ 事象の探索結果をアップデートした。データは

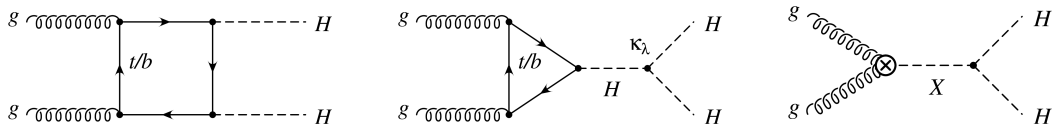


図 5: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

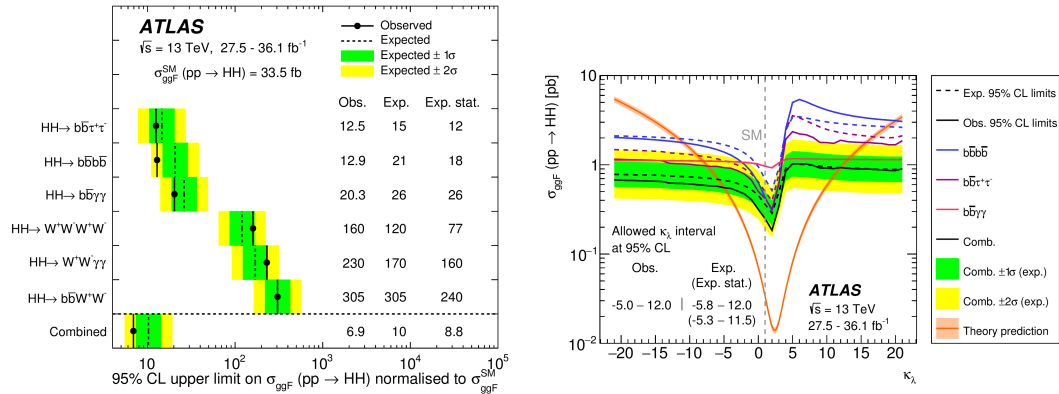


図 6: 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。(左) 解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) ヒッグス粒子の自己相互作用 κ_λ の関数として計算した生成断面積の上限。 κ_λ は標準理論の予言値で規格化して表示している。

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が、2 ヒッグス生成断面積に対して標準理論の予言する断面積の 40 倍に相当する上限を得た。先述した 36 fb^{-1} での同チャンネルの上限は標準理論の断面積の 305 倍であったのと比べると、解析感度が格段に改善された。今後、他のチャンネルの解析アップデートを待ち、複合結果もアップデートされる。

(4) 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

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

ここでは MSSM のうちでも h_{MSSM} シナリオに限って議論する。2 つのヒッグス・ダブレットを導入する MSSM では、3 つの荷電中性なヒッグス粒子 h 、 H 、 A と正と負の荷電を持ったヒッグス粒子 H^+ 、 H^- の計 5 つのヒッグス粒子が予言されている。これまでの実験データとの整合性から、すでに発見されている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子は h である可能性が高く、他の 4 つのヒッグス粒子は h よりも重い可能性が高い。

重いヒッグス粒子の直接探索解析による h_{MSSM} シナリオに対する棄却領域をまとめたの

が図7である。2020年に公表した $H \rightarrow \tau\tau$ 探索だけが 139 fb^{-1} のデータを使用した結果で、他のチャンネルは 36 fb^{-1} での解析の結果である。

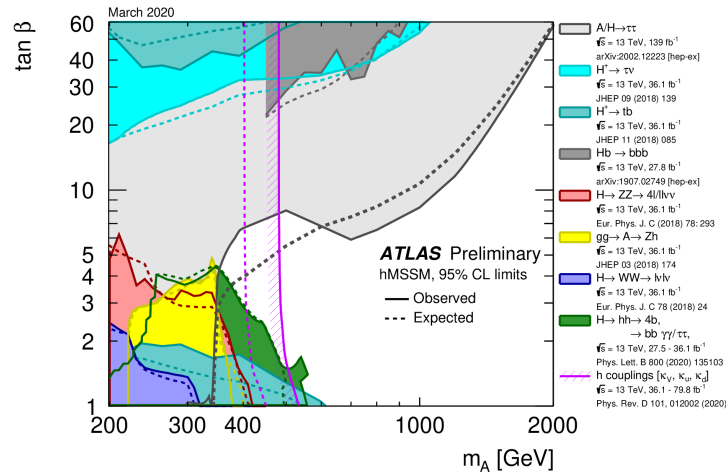


図 7: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

2021年2月には、トップクォークを随伴して生成し、 $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-2 全データを用いて探した解析結果を公表した。この解析で得られた生成断面積の上限と h_{MSSM} シナリオのパラメータに対する棄却域を図8に示す。

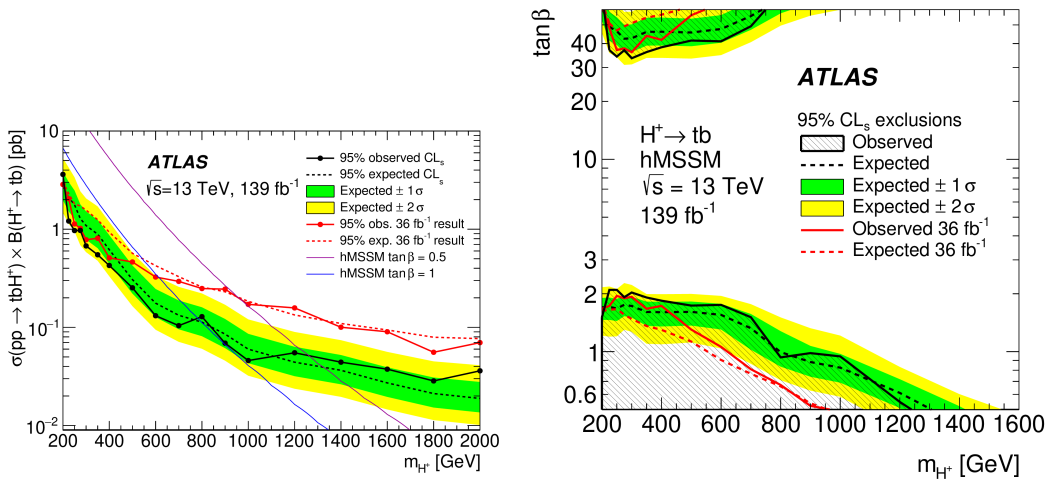


図 8: $H^\pm \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索結果。比較のために 36 fb^{-1} のデータによる結果を赤線で示している。(左) 荷電ヒッグス粒子の質量の関数として得られた生成断面積の上限値。(右) h_{MSSM} シナリオに対する制約。

(5) 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て

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2021年にかけてのLHCシャットダウン期間中では、今後のRun 3運転（2022–24年）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。シャットダウン期間を利用し、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準備をしておくことも重要となる。

SCT用シリコンストリップセンサーは、 n 型シリコンバルク上に p^+ 型ストリップを形成した p^+ -on- n 型シリコンセンサーである。 n 型バルクが損傷を受け、実効アクセプター濃度が上昇すると、実効的に p 型バルクとなる「型変換」を起こす。型変換前にはストリップ直下にあった pn 接合部は、型変換後には裏面の n^+ 型電極との境界部に移動する。すると、空乏層は裏面側から広がるようになるため、十分なバイアス電圧を印加して完全空乏化しないと、荷電粒子検出効率（ヒット検出効率）が低下してしまう。

このような型変換の兆候は、図9に示すヒット検出効率やノイズのバイアス電圧依存性によく顕れている。ヒット検出効率（図9左）は、空乏層が裏面側から広がるようになることを反映し、型変換後が起きた2017年11月以降はプラトーに到達する電圧が増加し、2018年終わりには約140Vとなっている。また、同時期にノイズのバイアス電圧依存性（図9右）には、数10から100V付近に、“ニー”（knee）と呼ばれる特徴的な依存性の変化が見える。このニーの前後で完全空乏化が起きていると考えられるが、放射線損傷により電場が複雑になるため、静電容量特性の電圧依存性に影響があらわれていると推測される。

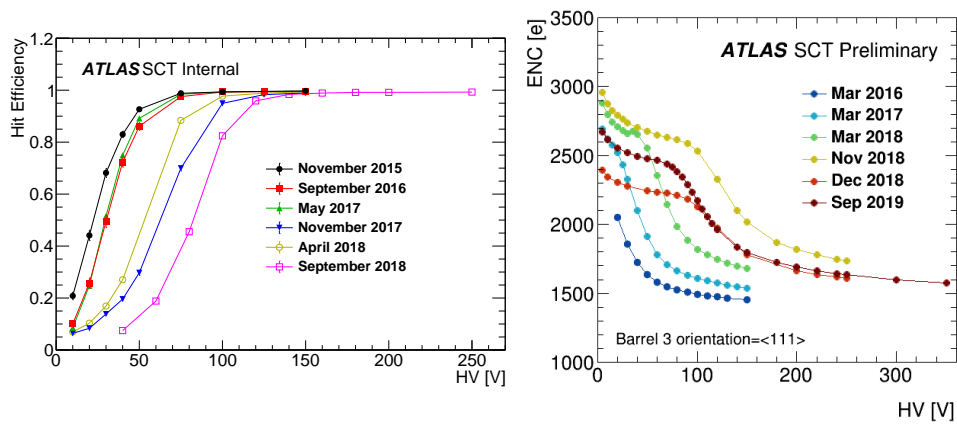


図 9: ヒット検出効率（左）とノイズ（右）のバイアス電圧依存性測定結果。

2022年より始まるATLAS Run 3運転において、SCTのバイアス電圧を完全空乏化電圧以上に保つことは、その性能を維持する鍵となる。より正確に現在の完全空乏化電圧を見積もるため、暗電流–電圧特性の変化を利用した測定手法を開発した。図10は、最も放射線量の多いSCT最内層における測定結果を示す。最下段に示されているように、暗電流は予想値と良く合致しており、またセンサー内の空乏層の体積に比例するため、完全空乏化電圧を見積もる良い指標となる。ここから見積もられた完全空乏化電圧は、図10の3段目に示されている。この図から、Run 2運転期間中における完全空乏化電圧の変化は、ハンブルクモデルにもとづく予想値とよく一致しており、2016–17年に型変換が発生したことも確認された。Run 3運転終了時点での完全空乏化電圧は約150V程度と予想されており、SCT電源

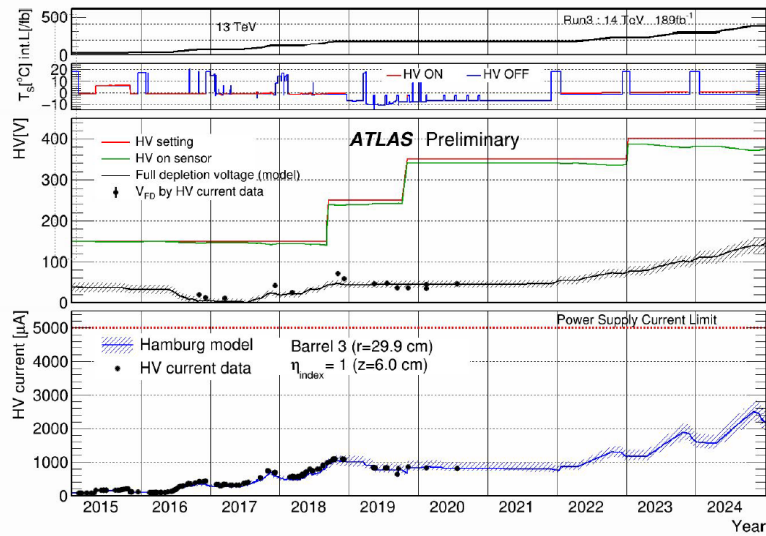


図 10: Run 2 から Run 3 運転期間における、積分ミノシティー（一段目）、センサー温度（二段目）、完全空乏化電圧（三段目）、漏れ電流（四段目）の変化。三段目の図中、黒実線はハンブルクモデルにもとづく予想、黒点は実測値を表す。また、バイアス電圧の設定値（赤実線）と、漏れ電流による電圧降下を考慮したセンサーに対する実効的なバイアス電圧（緑実線）も描かれている。四段目の図中、青実線はハンブルクモデルにもとづく予想、黒点は実測値を表す。

システムの設計上限値である 450 V と比べて十分に低く保たれると評価できる。

SCT センサーへの放射線損傷の影響は、将来の大型シリコン飛跡検出器システムの運用に対しても有用な情報となる。より詳細に、放射線損傷による性能への影響のメカニズムを理解するため、TCAD ソフトウェアによるシミュレーションを利用した研究も進めている。これまでに、図 11 に示すような、型変換後の p^+ -on- n 型シリコンストリップセンサーの特性を定性的に再現することに成功した。今後、格子欠陥密度の増加率などのシミュレーションパラメーターを決定し、定量的に実際の SCT を再現した上で、その放射線損傷に関するメカニズムの調査を進めていく。

(6) HL-LHC ATLAS 実験用シリコンセンサーの開発

2027 年より、LHC は瞬間ミノシティーを $7.5 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ に引き上げた高輝度運転を予定している (High-Luminosity LHC)。データ量および放射線量増加に対応するため、現行 ATLAS 検出器に対する大幅な改造が予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、すべてシリコンセンサーからなる Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。内層 5 層は $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ (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センサーで構成される。合計 180 m^2 もの面積をもつ、この大型シリコン検出器は、2026 年の完成を目指していよいよ設計を固めて最終仕様センサーの性能評価を行い、実機量産を開始するフェーズに入りつつある。筑波大では、主にセンサー設計及び性能評価、量産時の品質保証などを担っている。

(a) シリコンストリップセンサーの量産

ITk 用シリコンストリップセンサー量産の中で、筑波大では KEK と共同で

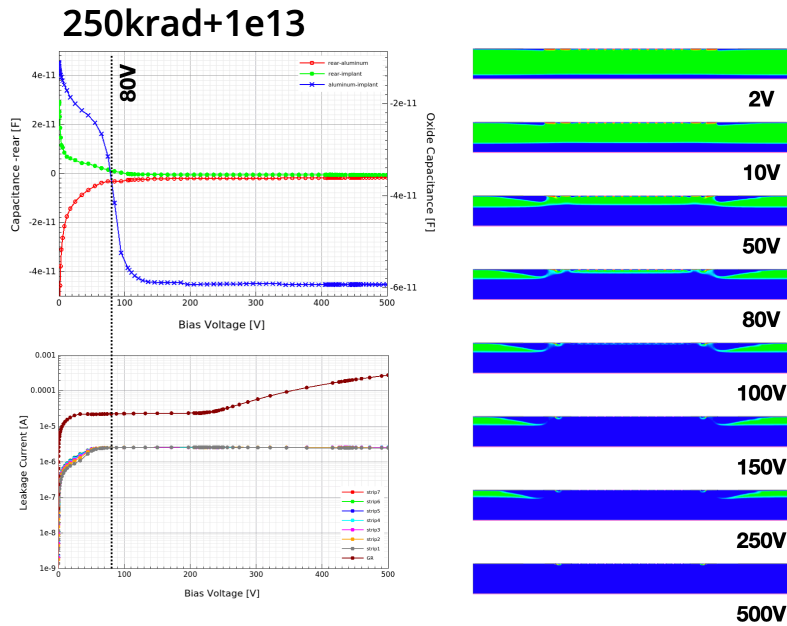


図 11: TCAD によってシミュレートした、放射線損傷後の静電容量（左上・青実線）および漏れ電流（左下・茶実線）のバイアス電圧依存性。このときのアクセプター濃度の変化を右に示す。緑領域がアクセプター濃度が高い領域、青が空乏化した領域を表す。

- 製造元である浜松ホトニクス社の協力のもとでの、全シリコンセンサーの基礎特性測定（quality control; QC）
- 1 cm² 角程度の性能テスト専用小型シリコンセンサー構造を用いた、抜き取り検査による放射線耐性試験（quality assurance; QA）

を担当する。2019 年度末には、供給予定量（約 2 万枚）の 1/20 程度の予備量産が行われ、この中で QC および QA 手順の構築と最終確認を行った。

QC については、2019 年度中に予備量産品全 318 枚すべての測定を完了し、良好な結果が得られていた。この時の知見から測定手順に対する詳細な検討を行い、必要な改善を適用した。これらをまとめた報告書もとに、ATLAS 実験グループ内部で審査が行われた結果、日本グループが QC サイトとして認定された。

QA については、2019 年度中に基礎的な部分は完成していた、テスト用シリコンセンサー構造（テストチップ、8 mm 角ミニダイオード、10 mm 角ミニストリップセンサー）測定装置に対して、さらに自動化などの改良を加え、必要最小限の操作で、安定してミスなく系統的な測定を可能とした（図 12 左）。この装置を用い、660 kGy のガンマ線照射を行ったテストチップおよびミニダイオードのストリップ間特性や暗電流・静電容量特性などを評価し、他に同測定を分担する世界 4 機関と合致する測定結果が得られることを確認した。この結果にもとづき、筑波大はテストチップおよびミニダイオード評価サイトとして認定された（ミニセンサーについては 2019 年度に認定済み）。また、7 月及び 10 月には東北大学サイリックにおいて、テスト用センサーに対する 1 MeV 中性子換算で最大 $1.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ （HL-LHC ATLAS における予想線量の 1.5 倍）の陽子線照射を行い、2020 年 2 月照射分も合わせて約 40 枚のテストセンサーの放射線損傷を評価した。この中で、特に陽子照射をしたサンプルの場合、バルク損傷による大きな暗電流の影響が大きい中で微小なストリップ間電流を測定しなければならず、これまでに ATLAS 実験グループ内で策定されていた手順では測定が不

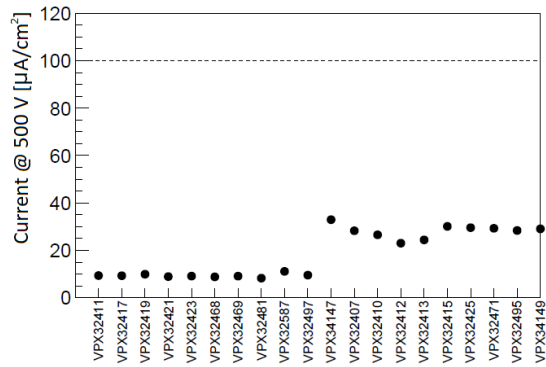
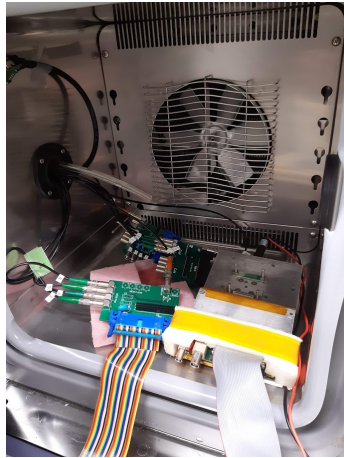


図 12: (左) ストリップセンサー QA システムの様子。センサーは恒温槽の内部に置かれ、 -20°C で測定される。(中) 20 枚のテストチップに対する測定結果。ミニダイオードでの暗電流の測定例で、点線は要求値 ($100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下) を示す。左半分と右半分は照射量が異なり、それぞれ 1 MeV 中性子換算で $5.1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ と $1.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 。

安定になることがわかった。筑波大が中心となって測定方法の改良を考案・実証し、この新しい測定手順が実験グループ内でも承認された。

2021 年 2 月に行われた外部審査員を含めた本量産準備状況レビュー (production readiness review; PRR) において、本量産に向けたシリコンストリップセンサー QC、QA および受け入れ準備状況が審査され、ここでの議論をもとに、シリコンストリップセンサーの本量産がついに承認された。2021 年 7 月より、約 3.8 年にもわたるセンサー量産が開始される予定である。

(b) シリコンピクセルセンサー性能評価

ITk シリコンピクセル検出器については、日本グループ (筑波大の他 KEK など 8 大学・研究機関が参加) がモジュール製造までを担当する。2019 年度末に、フェルミ国立加速器研究所において実機仕様に近いクワッドモジュールを用いたビームテストを実施したが、2020 年度にはその解析を進めた。本実験に用いたクワッドモジュールは、約 4 cm 角のシリコンピクセルセンサーに、約 $1 \times 2\text{ cm}$ 角の信号読み出し用集積回路 RD53A をバンプボンディングにより貼り合わせた構造となっているが、その全面において概ね 99% 以上の高い荷電粒子飛跡検出効率を確認した (図 13 左)。さらに、センサー中央の特殊構造を持つピクセルに関してより詳細な解析を行った。この部分は隣接する RD53A 同士の干渉を防ぐため、ピクセルサイズを $100\ \mu\text{m}$ 幅に広げることでスペースを確保し、さらに信号読み出し用アルミ電極に隣接ピクセル上を通過させる構造になっている。したがって、この部分におけるクロストークの増加が懸念されたのであるが、本研究によりクロストークによる位置分解能の悪化は無視できるほど小さいことを確認した。この研究の中で、中央部ピクセルにおいて信号が正しく検出されない部分があることを同定した。これについて製造元と協議し、最終版では設計の微修正により改善されることとなった。

モジュール製造工程の中で、筑波大は主にセンサーと集積回路をバンプボンディングによって貼り合わせるフリップチップ工程の品質評価を行った。図 13 中に評価例を示す。この評価に用いた RD53A は、性能比較のため 3 つの異なる信号処理回路を搭載しており、それぞれの回路間の影響があることがわかっている。これに対し、各回路の最適なパラメーター

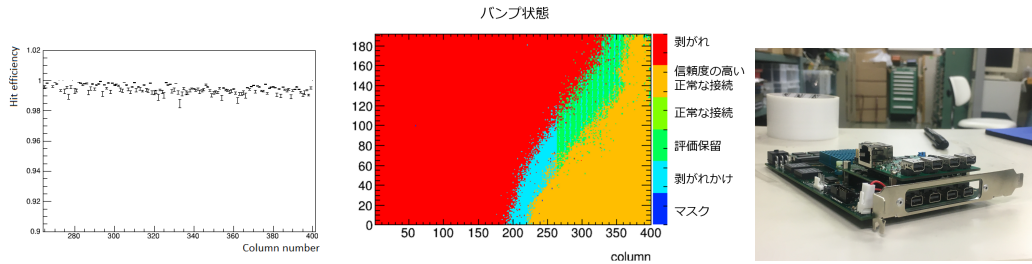


図 13: (左) ITk ピクセルクワッドモジュールのビームテストで測定したヒット検出効率。(中) バンパ状態分類結果の一例。これは大きなバンパ剥がれがあったサンプルで、赤色で示された領域で剥がれが検出されている。(右) ITkpixv1 モジュール信号読み出し用に製作した読み出し信号処理ボード。

設定を効率的に探し出し、さらにテスト入力電荷およびベータ線に対する応答性をうまく利用して、バンパボンディングが剥がれている部分を特定する手法を開発した。本研究で得られた手法を用いて合計 17 モジュールのフリップチップ品質を評価し、最終設計レビュー (final design review; FDR) で報告した。この結果、国内企業の一社がフリップチップ実施企業として認定され、日本国内で一貫したモジュール製造体制を確立することができた。

今後、実機用集積回路 ITkpix を用いた最終仕様ピクセルモジュールを試作し、ピクセルセンサーを含めた性能確認を行う。2020 年度に、その信号読み出しのためのシステム構築を開始した (図 13 右)。今後、試作モジュールの信号読み出し試験を行い、ピクセルセンサー FDR に向けて性能評価を実施していく。

[2] 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 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) 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。

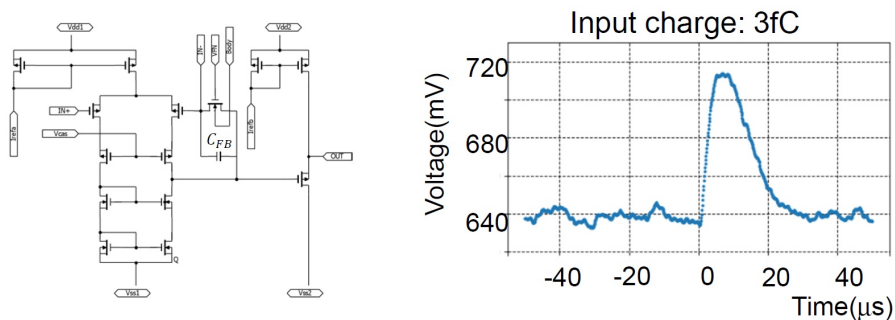


図 14: SOI 技術を用いて製作された 60 fF の容量性負帰還を持つ差動増幅回路による電荷積分型増幅器と 3 fC のテスト電荷入力に対する出力。

現在、産総研 CRAVITY 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、冷凍機内の極低温ステージ上の STJ からの信号の読出しは (a) Nb/Al-STJ 素子の動作バイアス電圧は、0.4mV 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 250 e (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、数十 pF～数 nF と大きい、という理由によりこの実現は極めてチャレンジングと言える。そこで、我々のグループでは信号読出系として KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究による 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。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、及び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増幅読出に成功等がある。また、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に成功している。2020 年度における成果としては、この電荷積分型増幅器の負帰還容量を従来の 300 fF から 60 fF に変更した高利得増幅回路の動作を確認した (図 15)。しかし、実測により入力インピーダンスが想定よりも一桁大きく、STJ からの電荷信号が増幅器にほとんど伝達されていないことが明らかになり、差動増幅回路部の開ループ利得及び利得帯域幅積を一桁以上改善することが必要であることが判明し、課題とされた。

また、Hf-STJ の開発においては、韓国 IBS のグループとの共同研究によって X 線に対する応答を無冷媒断熱消磁冷凍機を用いて測定し、Hf-STJ として世界で初めて ^{55}Fe からの X 線域単一光子に対する応答信号を分解能 6.7% で確認することに成功し、この成果について、論文執筆のための測定データ解析を進めている (図 16)。

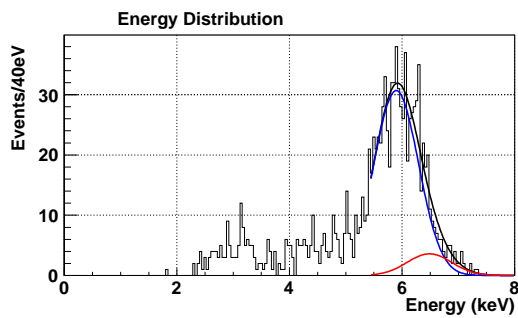


図 15: 200 μm 角の Hf-STJ に冷凍機内で ^{55}Fe からの X 線を照射し得られた X 線単一光子に対するエネルギー分布。 ^{55}Fe の $K\alpha, K\beta$ のエネルギー比及び強度比は既知として、分布から 5.9 keV のエネルギーに対して分解能 6.7% を得た。

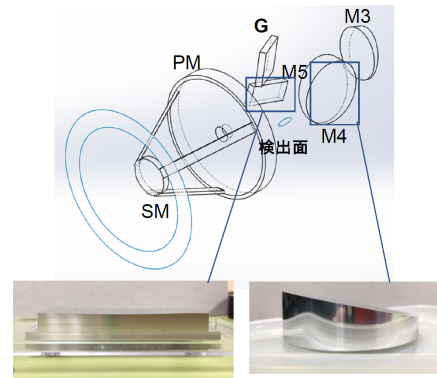


図 16: 光学シミュレーションの計算に基づき設計された望遠鏡光学系の構造図。光学系を構成するミラー M4, M5 は試作され、レーザーポインタを使用して集光位置の測定によるシミュレーションとの比較が行われた。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が現実のものとなれば、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、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 μm 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。2020 年度における成果としては、望遠鏡光学系の光学シミュレーションによ

る集光効率の計算，及び光学系の設計の最適化を行い，ミラーの一部の試作(図14)，及び可視光レーザポインタを用いたシミュレーションとの比較を行った。また，STJ素子表面に施す反射防止膜としてSTJのNb受光面に接着するシリコン薄膜の試作を行った。更にシリコン膜厚の最適値を求めるため，極低温での50 μm 域光に対するNb屈折率・消衰係数のデータが必要であり，その測定に向けた予備実験として室温・可視光域での測定を遂行中である。

【3】 LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発

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

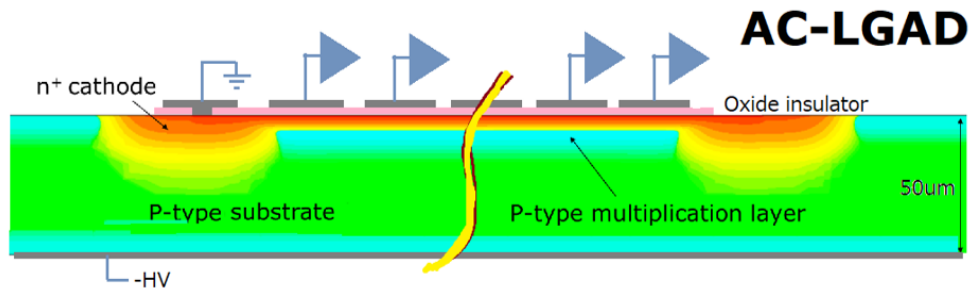


図 17: AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

LGAD 検出器としては 1.3 mm 角のパッドタイプのものが HL-LHC 実験用に ATLAS に採用された。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る。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 17 に AC-LGAD の概念図を示す。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。2019 年度から科研費を受け、AC-LGAD の設計に基づいて浜松ホトニクスで試作をし、2020 年度に主として β 線を用いて実際の評価を進めた。また、放射線耐性に関して東北大 CYRIC で陽子線を照射して評価した。

電極細分化は 80 μm のピッチに分割したストリップ型検出器で評価した。図 18 は、通過する β 線に対して、最大波高のストリップで規格化した隣接ストリップ電極での波高値の分布を示す。隣接電極で平均して 65%、さらに隣では約 50% に減少する。この特性は電荷の広がりから位置情報を得る良い指標となるが、広がりすぎると高粒子密度では使えなくなる。図の右は、図左の電荷の広がりを指数関数でフィットしたときの広がりのパラメータを n^{++} 電極の抵抗値の依存性として示した。A タイプは従来の LGAD (DC-LGAD) での抵抗値と等しく、右に B \rightarrow E に従い抵抗は大きくなる。予想通りに n^{++} 濃度が低い右ほど電

荷の広がりには小さい結果となった。図には酸化膜厚を小さくしAC電極との結合を増やしたサンプル(b型)の結果も示している。結合容量の大きなbサンプルは、わずかながらも広がりには小さく抑えられる。

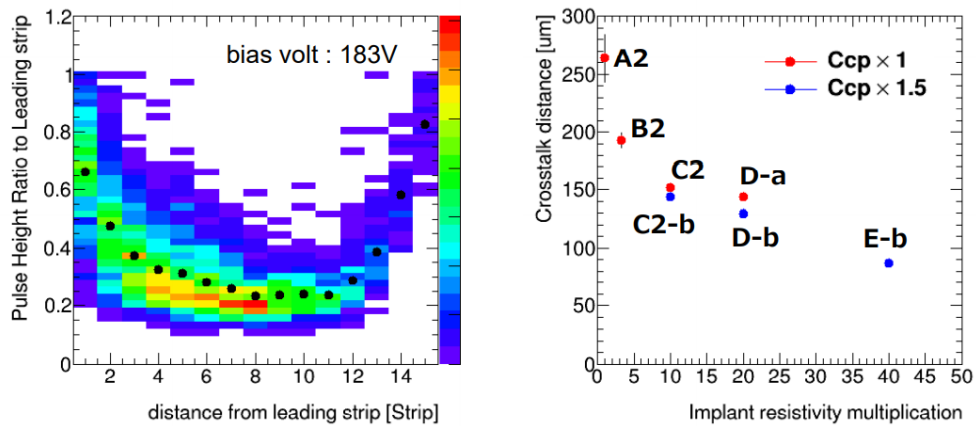


図 18: ストリップ型 LGAD での信号の広がりの評価。(左) 通過する β 線に対して、最大波高のストリップで規格化した隣接ストリップ電極での波高値の分布。(右) 異なる n^{++} 濃度 (A-D) と酸化膜厚 (a,b) 条件での信号の広がり依存性。

この電荷の広がり、境界部に β 線が入射したためのものか信号の広がり起因のものかは判定できない。テストビームによる詳細な評価を計画している。

将来の加速器実験で用いるには放射線耐性は不可欠な評価要素である。CYRIC では $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの陽子線照射をした。図 19 には、C 2 タイプのサンプルに対し未照射、 $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ および $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ での電流-電圧特性を示す。アバランシェ増幅を開始することで電流が増幅するが、照射後も増幅機構が保たれている。

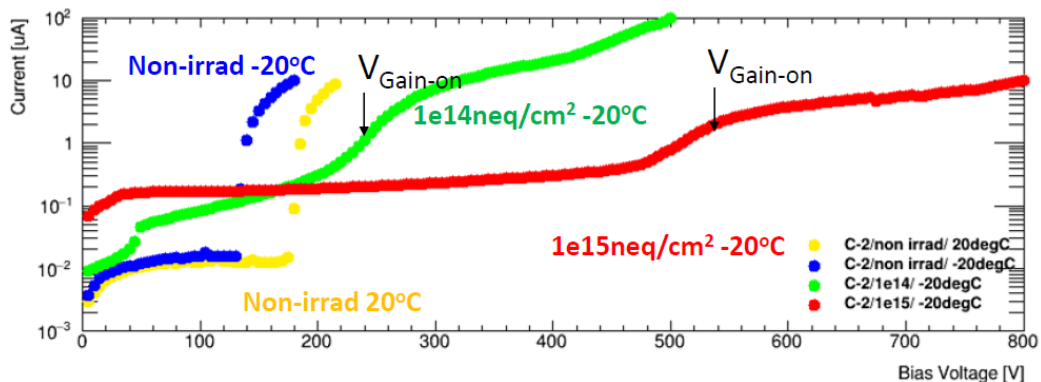


図 19: 未照射および陽子線照射後の電流-電圧特性。未照射 (-20°C) では 140 V でアバランシェ増幅が始まる。照射後は増幅の開始電圧が上昇するが LGAD としての増幅機能は保たれている。

2020 年度は、前年度に試作した A-C 型の評価結果を受け、 n^{++} 電極濃度を低くした D, E 型と酸化膜厚を小さくした b 型を再試作した。まずは AC-LGAD がセンサーとして機能することが実証でき、さらに評価を重ねた結果、電荷の広がりとしては満足できるサンプル (E) を試作できたことは大きな成果である。一方で D, E 型の放射線耐性の評価は実施していないのでこれから行う。

本研究は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)で、米国のフェルミ研究所、LBL研究所、UCSC大学との連携で開発研究を推進してきた。センサーの基本部分の開発研究が大きく進み、今後はセンサー設計の詳細検討にくわえて、読出しのエレクトロニクスを海外と協力して開発していく。

【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 μm 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 年度から、PDD をもつセンサーの放射線耐性を評価している。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 積層した SOFIST4 の試作に成功した。2020 年度は TIA かけはしの新たなテーマとして「究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して」を開始した。

(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、同時に SOI 回路に対して裏面に加えるバイアス電圧からの影響(バックバイアス効果)を抑える機能がある。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もある。2019 年度は PDD 構造をもつセンサーの ^{60}Co γ 線照射試験を行ったが、2020 年度は CYRIC での陽子照射を行った。 ^{60}Co γ 線照射でも陽子照射でも比較的大きな暗電流が発生したが、暗電流は図 20 に示すように、バルク部損傷による効果と界面の損傷による効果に大別でき、前者は陽子線照射で特有な効果である。そこで、2つの効果を分離評価できるようなテスト素子を用い、さらに照射後に温度を加えた後の暗電流測定を温度を増加させながら繰り返す測定(等時間間隔アニーリング測定)を行った(図 20 右)。温度を加えることで界面損傷の効果は消失するが、照射直後の暗電流値は最終的に 9 割が消失するのでこれが界面損傷の寄与と推定できる。MOS-FET の動作原理から、このデータを定量的解析し両者の効果を分離評価した。結果は論文としてまとめる。

(2) KEK AR-TB に用いるトラッカー開発

SOI ピクセルセンサーの特筆できる利点は高位置分解能と低物質量化である。KEK では TRISTAN の入射蓄積リングに最大 5 GeV の電子ビームを用いたビームラインを整備中で、これは世界的にはドイツ DESY 研究所のラインに匹敵する電子テストビームラインとなる。このエネルギー領域の電子はクーロン多重散乱の影響を受けやすく、SOI ピクセルを用いることで同ビームラインの性能を最大限発揮できるトラッカーが実現できる。図 21 は

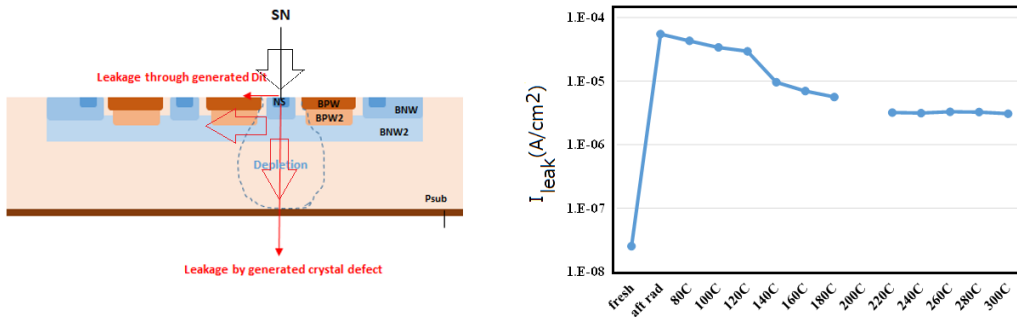


図 20: (左) PDD 構造をもつセンサーの放射線による暗電流成分増加に対する寄与、(右) $1 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ の陽子線照射を行った PDD ピクセルセンサーの初期暗電流と照射後の等時間間隔アニーリング測定での暗電流の変化。

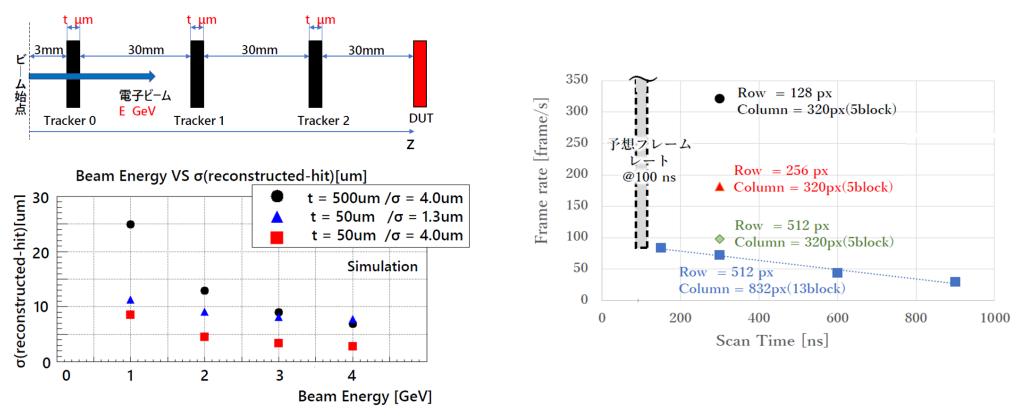


図 21: (左) GEANT 4 シミュレーションで DUT 位置でのトラッカー飛跡の位置分解能を電子のエネルギーの関数として評価した。(右) 現有のシステムで計測したデータ収集レート

GEANT4 シミュレーションにより、3 枚の SOI ピクセル検出器で達成できる DUT 位置での位置分解能を示す。シミュレーションではピクセルサイズが $17 \mu\text{m}$ 角の INTPIX 4 を想定し、センサー厚は 500 と $50 \mu\text{m}$ 、またセンサー内での拡散効果をパラメータにしている。4 GeV では $7 \mu\text{m}$ もしくは薄くすること $3 \mu\text{m}$ も期待できる。

このシミュレーション結果を受け、INTPIX 4 の改良版である INTPIX 4 NA 用のボードを設計試作し、読みだし試験を行った。今後は現センサー ($300 \mu\text{m}$ 厚) でのビーム試験と薄型化のための研究を進める。高速読み出しのための FPGA ボードの改良も行う。

【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。

2020年には2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が圧力容器の下部に堆積している）がPTEPから出版された。

【6】 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。本年は、これまでに開発を進めてきた ^{48}Ca を含むヨウ化カルシウム (CaI_2) シンチレータに対して、低温での特性を評価した。 CaI_2 は発光量がプラスチックシンチレータの10倍近く、波形による粒子識別も可能であるため、高性能なシンチレータとして有望である。いくつかのアルカリハライド無機シンチレータでは温度を冷やすことで発光量の増加が報告されており、 CaI_2 でも低温でさらなる発光量の増加が期待される。

金属材料研究所吉川研究室の炉を用いて Bridgman-Stroockbarger 法で、2インチ径の CaI_2 結晶育成を行った。多少のクラックが入ってしまったが、作成した結晶を大阪の ISC Lab. 株式会社に送って加工を委託した。その結果、1.5 cm 角× 2 mm 厚程度に結晶を切り出し、アルミケースに封止することに成功した（図 22 左）。この結晶を、ウルトラバイアルカリ光電面を持つ光電子増倍管 (R7600U-200) にグリースを用いて接着し、全体をマイナス 40℃まで温度コントロールが可能な恒温槽内に設置、外側から ^{137}Cs 線源からのガンマ線を照射した。光電子増倍管には HV モジュールで高電圧をかけ、出力信号はシェーピングアンプ (ORTEC 572A) を通して、MCA (ORTEC 926) でスペクトルを取得した。実験セットアップの概要を図 22 中央に示す。また、波形の測定では、光電子増倍管の信号を PM アンプで 10 倍に増幅し、Waveform digitizer に入力してデータを取得した。温度は、常温 (20℃) から、10 度おきに -40℃まで変えて測定を行った。

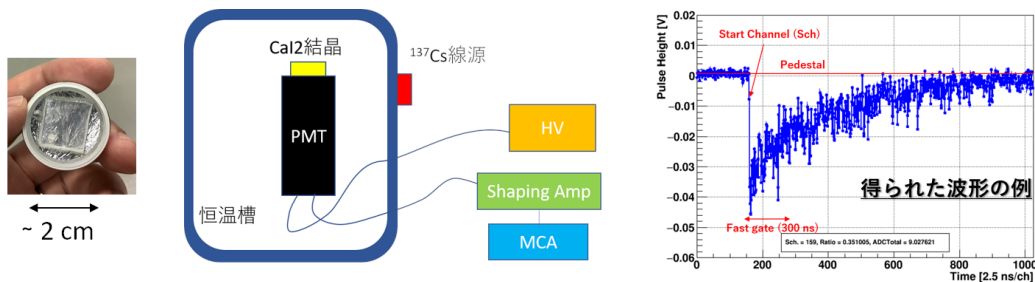


図 22: (左) 金研で育成し、業者で加工した CaI_2 結晶。(中) 低温でのスペクトル測定実験のセットアップ。(右) 波形測定実験で得られた波形データのサンプル。

異なる温度で得られたエネルギースペクトルを図 23 左に示す。それぞれ、20 °C（青）、0 °C（赤）、-20 °C（緑）、-40 °C（青）の分布となっている。温度が下がるにつれて、Cs の 662 keV の光電ピークが右にシフトしており、発光量の増加が確認できる。図 23 右は、各温度でのピーク位置を相対的にプロットしたものである。20 °C の場合を 1 としているが、-40 °C まで冷やすことで 27% 程度の発光量増加が確認された。-30 °C まではほぼ線形に変化しており、その変化率は約 0.5%/°C と見積もられた。同じく Ca を含むアルカリハライド結晶である CaF₂ では、約 2%/°C という値が報告されており、それよりは温度依存性は小さいことが分かった。図 24 は温度ごとの平均波形をプロットしたものである。温度が下がるにつれて、遅い発光成分が増えて波形の時定数が長くなっていることが見て取れる。

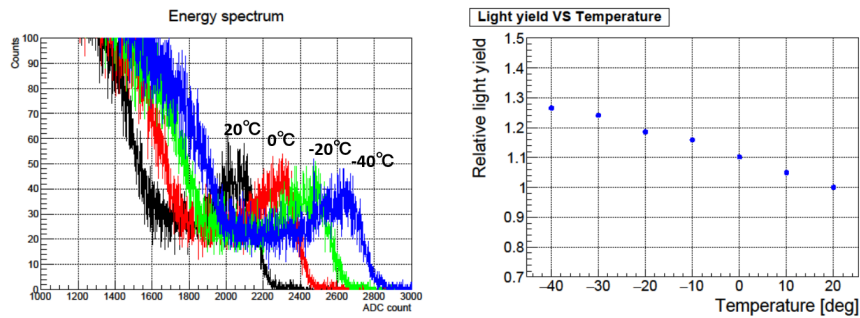


図 23: (左) Cs 線源照射時の各温度でのエネルギースペクトル。(右) 横軸温度、縦軸相対発光量の二次元プロット。20 °C の値を 1 としている。

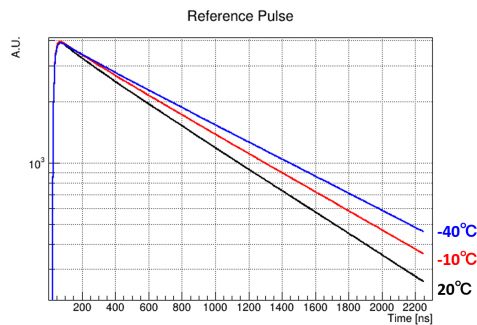


図 24: 温度による平均波形の変化。

以上の通り、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索を目的としてこれまでに開発を進めてきたヨウ化カルシウム (CaI₂) 結晶を用いて、その低温での発光特性評価を行った。その結果、以下の 2 点が明らかになった。

- 低温で発光量が増加する (1 °C 当たり約 0.5%)。
- 低温で発光時定数が長くなる。

発光量の増加が二重ベータ崩壊探索で重要なエネルギー分解能や粒子波形識別能にどのような影響を与えるのか、今後調査を継続していく。

〈 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）(2020 年度)
2. 基盤研究 (C)「ニュートリノ崩壊光子検出器較正用超低エネルギー光子パルス照射システムの開発」2016-2020 年度、研究代表者：吉田拓生 650 千円 (直接経費: 500 千円、間接経費: 150 千円)(2020 年度)
3. 基盤研究 (B)「超伝導体素子による極低閾値検出器開発と sub-GeV 領域暗黒物質探索への展開」2020-2022 年度、研究代表者：武内勇司 6,370 千円 (直接経費: 4,900 千円、間接経費: 1,470 千円)(2020 年度)
4. 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 2,500 千円、間接経費 750 千円) (2020 年度)
5. 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, 4,030 千円 (直接経費 3,100 千円、間接経費 930 千円) (2020 年度)
6. 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) (2020 年度)
7. 科学研究費 研究活動スタート支援「高輝度 LHC における高精度ヒッグス粒子測定に向けたシリコン飛跡検出器開発」、2020 - 2021 年度、研究代表者：廣瀬茂輝, 1,300 千円 (直接経費: 1,000 千円、間接経費: 300 千円) (2020 年度)
8. TIA かけはし「究極の広帯域量子イメージセンサ実現を目指して」、2020 年度、研究分担者：原和彦, 100 千円 (2020 年度)

〈 受賞 〉

1. 飯田崇史、東北大学金属材料研究所の「第 8 回研究部共同利用・共同研究若手萌芽研究最優秀賞」を受賞

〈 国際会議の実施 〉

1. 29th Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020), online, October 5-8, 2020, Organizing Committee Chair: Kazuhiko Hara

〈 論文 〉

(査読論文)

1. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation and Measurement of Forward Proton Scattering in Association with Lepton Pairs Produced via the Photon Fusion Mechanism at ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 261801 (2020).
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions recorded by ATLAS in Run 2 of the LHC,” *JHEP* **10**, 062 (2020).
3. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a photon and a hadronically decaying Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 251802 (2020).
4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with one lepton, missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 691 (2020).
5. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for $t\bar{t}t\bar{t}$ production in the multilepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1085 (2020).
6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction and identification of boosted di- τ systems in a search for Higgs boson pairs using 13 TeV proton-proton collision data in ATLAS,” *JHEP* **11**, 163 (2020).
7. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation of the ATLAS trigger system in Run 2,” *JINST* **15**, P10004 (2020).
8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into a weak vector boson and a Higgs boson in the fully hadronic final state produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 112008 (2020).
9. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Alignment of the ATLAS Inner Detector in Run-2,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1194 (2020).
10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of inclusive and differential cross-sections of combined $t\bar{t}\gamma$ and $tW\gamma$ production in the $e\mu$ channel at 13 TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 049 (2020).

11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new non-resonant phenomena in high-mass dilepton final states with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 005 (2020). [erratum: *JHEP* **04**, 142 (2021)]
12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section in the lepton+jets channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **810**, 135797 (2020).
13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pairs of scalar leptoquarks decaying into quarks and electrons or muons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 112 (2020).
14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in events with a Higgs or Z boson using 139 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1080 (2020).
15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into two new low-mass spin-0 particles in the $4b$ channel with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **102**, 112006 (2020).
16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the missing transverse momentum triggers for the ATLAS detector during Run-2 data taking,” *JHEP* **08**, 080 (2020).
17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **809**, 135754 (2020).
18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $t\bar{t}$ resonances in fully hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 061 (2020).
19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the upgraded PreProcessor of the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger,” *JINST* **15**, P11016 (2020).
20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [CMS and ATLAS], “Combination of the W boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **08**, 051 (2020).
21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet resonance search with weak supervision using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions in the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 131801 (2020).
22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in pp

- collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1165 (2020).
23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the all-hadronic $t\bar{t}$ plus missing transverse momentum final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 737 (2020).
 24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2,” *JINST* **15**, P09015 (2020).
 25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of electroweakinos in final states with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 005 (2020).
 26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ CP Properties of Higgs Boson Interactions with Top Quarks in the $t\bar{t}H$ and tH Processes Using $H \rightarrow \gamma\gamma$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 061802 (2020).
 27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross sections in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 942 (2020).
 28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Lund Jet Plane Using Charged Particles in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 222002 (2020).
 29. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Higgs boson production cross-section measurements and their EFT interpretation in the 4ℓ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 957 (2020). [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 29 (2021); erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 398 (2021)]
 30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs Boson Decays into a Z Boson and a Light Hadronically Decaying Resonance Using 13 TeV pp Collision Data from the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 221802 (2020).
 31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with a displaced vertex and a muon with large impact parameter in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 032006 (2020).

32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 044 (2020).
33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **807**, 135595 (2020).
34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy Higgs bosons decaying into two tau leptons with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **125**, 051801 (2020).
35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dijet resonances in events with an isolated charged lepton using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data collected by the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 151 (2020).
36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of the associated production of a top quark and a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 124 (2020).
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson in the $H \rightarrow \tau\tau$ channel in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **805**, 135426 (2020).
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ process via vector-boson fusion production using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 108 (2020). [erratum: *JHEP* **01**, 145 (2021)]
39. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of soft-drop jet observables in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. D* **101**, 052007 (2020).
40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of isolated-photon plus two-jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 179 (2020).
41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 072001 (2020).

42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell–Yan lepton pairs in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 616 (2020).
43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 052005 (2020).
44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV decaying into displaced hadronic jets in the ATLAS inner detector and muon spectrometer,” *Phys. Rev. D* **101**, 052013 (2020).
45. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct stau production in events with two hadronic τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **101**, 032009 (2020).
46. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z(\rightarrow \ell^+ \ell^-) \gamma$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 054 (2020).
47. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged-particle production in $Xe + Xe$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **101**, 024906 (2020).
48. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS data quality operations and performance for 2015–2018 data-taking,” *JINST* **15**, P04003 (2020).
49. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections for single diffractive dissociation in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS ALFA spectrometer,” *JHEP* **02**, 042 (2020). [erratum: *JHEP* **10**, 182 (2020).]
50. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum and process dependent azimuthal anisotropies in $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV p +Pb collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 73 (2020).
51. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ Z boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **802**, 135262 (2020).

52. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for electroweak production of two jets in association with a $Z\gamma$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **803**, 135341 (2020).
53. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section and lepton differential distributions in $e\mu$ dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 528 (2020).
54. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in mass distributions of jet pairs using 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 145 (2020).
55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of jet calibration and energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 1104 (2020).
56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of J/ψ production in association with a $W^{\text{f}}_{\text{b}}{\text{b}}$ boson with pp data at 8 TeV,” *JHEP* **01**, 095 (2020).
57. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson decays $H \rightarrow ee$ and $H \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **801**, 135148 (2020).
58. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with same-sign leptons and jets using 139 fb^{-1} of data collected with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 046 (2020).
59. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **101**, 012002 (2020).
60. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of azimuthal anisotropy of muons from charm and bottom hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 082301 (2020).
61. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for light long-lived neutral particles produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV and decaying into collimated leptons or light hadrons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 450 (2020).
62. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of electron and photon triggers in ATLAS during LHC Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 47 (2020).

63. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral currents in processes with one top quark and a photon using 81 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **800**, 135082 (2020).
64. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collisions using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 123 (2020).
65. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, 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 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **79**, 1028 (2019) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **80**, 1092 (2020).]
66. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for non-resonant Higgs boson pair production in the $bbl\nu\ell\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$,” *Phys. Lett. B* **801**, 135145 (2020).
67. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, 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 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **100**, 064901 (2019) [erratum: *Phys. Rev. C* **101**, 059903 (2020).]
68. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for displaced vertices of oppositely charged leptons from decays of long-lived particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **801**, 135114 (2020).
69. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for lepton-flavour-violating decays of the Higgs boson in $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135069 (2020).
70. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy neutral Higgs bosons produced in association with b -quarks and decaying into b -quarks at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **102**, 032004 (2020).
71. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances in hadronic final states in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **09**, 091 (2019) [erratum: *JHEP* **06**, 042 (2020).]

72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range two-particle azimuthal correlations in Z -boson tagged pp collisions at $\sqrt{s}=8$ and 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 64 (2020).
73. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for Higgs boson pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **800**, 135103 (2020).
74. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Magnetic Monopoles and Stable High-Electric-Charge Objects in 13 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 031802 (2020).
75. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fluctuations of anisotropic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **01**, 051 (2020).
76. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair spin correlations in the $e\mu$ channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV using pp collisions in the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **80**, 754 (2020).
77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections and W^+/W^- cross-section ratios for W boson production in association with jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 077 (2018) [erratum: *JHEP* **10**, 048 (2020).]
78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **94**, 092003 (2016) [addendum: *Phys. Rev. D* **101**, 119901 (2020).]
79. K. Sato, *et al.*, (K. Hara, K. Onaru, D. Harada, S. Wada), “Characteristics of silicon strip sensor irradiated up to a proton fluence of 10^{17} n_{eq}/cm²”, *Nucl. Inst. Meth. A982* (2019) 164507.
80. H. Murayama, *et al.*, (K. Hara, H. Yamauchi, R. Abe, S. Iwanami, K. Watanabe, Y. Okada), “Development of monolithic SOI pixel sensors capable of fine measurements of space and time”, *Nucl. Inst. Meth. A982* (2019) 164417.
81. K. Hara, *et al.* (D. Harada, K. Onaru, K. Sato, S. Wada), “Charge collection study with the ATLAS ITk prototype silicon stripsensors ATLAS17LS”, *Nucl. Inst. Meth. A982* (2019) 164422. .
82. M. Mikesikova, *et al.* (K. Hara, K. Onaru, K. Sato, S. Wada), “Electrical characterization of surface properties of the ATLAS17LS sensors after neutron, proton and gamma irradiation”, *Nucl. Inst. Meth. A982* (2019) 164456. .

83. J. Fernandez-Tejero, *et al.* (K. Hara, S. Wada), “Humidity Sensitivity of Large Area Silicon Sensors: Study and Implications”, Nucl. Instr. Meth. A982 (2019) 164406.
84. H. Fujii, *et al.* (K. Hara, S.H. Kim), “Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography”, PTEP Vol. 2020, Issue 4, Apr 2020, 043C02.
85. H. Fujii, *et al.* (K. Hara, S.H. Kim), “Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography”, PTEP Vol. 2021, Issue 2, Feb 2021, 023C01.
86. T. Iida, *et al.*, “The energy calibration system for CANDLES using (n, γ) reaction”, Nucl. Instr. Meth. A986, 164727(2021).
87. B. T. Khai *et al.* (T.Iida), “A Study on Energy Resolution of CANDLES Detector”, IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol 68, Issue 3, Page 368-378 (2021).
88. S. Umehara *et al.* (T. Iida), “Search for neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca -CANDLES-”, Journal of Physics: Conference Series/1342/p.012049 (2020).
89. T. Iida, Y. Kibe and Y. Kondo, “Development of water scintillator for a future large-scale neutrino experiment”, 2019 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imag. Conf. Proc. (NSS/MIC), pp. 1-3 (2020).
90. T. Iida, *et al.*, “R&D of new high-performance scintillator including double beta decay nuclei”, 2019 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imag. Conf. Proc. (NSS/MIC), pp. 1-3 (2020).
91. T. Iida, *et al.*, “High-light-yield calcium iodide (CaI_2) scintillator for astroparticle physics”, Nucl. Instr. Meth. A958, 162629 (2019).
92. S. Hirose [ATLAS SCT Group], “The operational experience, challenges and performance of the ATLAS Semiconductor Tracker during LHC Run 2,” PoS **Vertex2019**, 005 (2020) doi:10.22323/1.373.0005.
93. S. Wada, *et al.* (K. Onaru, K. Hara), “Design of a Segmented LGAD Sensor for the Development of a 4-D Tracking Detector,” PoS **Vertex2019**, 057 (2020) doi:10.22323/1.373.0057.

(査読なし論文)

1. 飯田崇史、尾崎秀義、石徹白晃治、 「ニュートリノは神の粒子か？ — 神岡地下1000mで進む $0\nu\beta\beta$ 発見への挑戦 —」 高エネルギーニューズ Vol.39 No.3 99-109 ページ.

< 学会発表 >

(国内)

1. 原和彦：4次元飛跡検出器の開発,
宇宙史研究センター 2020 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2020 年 6 月 15 日), オンライン
2. 吉田拓生：COBAND 実験のための遠赤外光源開発,
宇宙史研究センター 2020 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2020 年 6 月 15 日), オンライン
3. 廣瀬茂輝：LHC-Run2 全データを用いたヒッグス粒子解析と来年度開始予定の Run3 準備状況,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
4. 山内大輝：HC-ATLAS 実験でのブーストしたトップクォーク事象を用いた荷電ヒッグス粒子探索手法の開発,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
5. 若狭玲那：LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるセミレプトニック終状態を用いた弱ボソン散乱過程の断面積測定,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
6. 齊藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるストリップ型シリコンセンサーの品質管理および品質保証システムの構築とデータ解析,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
7. 佐藤勝哉：HL-LHC ATLAS 内部飛跡検出器アップグレードに向けたクアド型ピクセルセンサーのテストビームを用いた性能評価,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
8. 植田樹：高時間分解能半導体検出器 (LGAD) に関する基礎研究と性能評価,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
9. 浅野千紗：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 V,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
10. 山根綾太：COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計,
日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月 14-17 日), オンライン
11. 原和彦：ATLAS ITk ストリップ型シリコン検出器の初期量産,
宇宙史研究センター 2020 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2020 年 11 月 30 日), オンライン
12. 武内勇司：COBAND プロジェクトにおける STJ 信号読出のための極低温 SOI 増幅器の開発,
宇宙史研究センター 2020 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2020 年 11 月 30 日), オンライン
13. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS ピクセル検出器におけるバンプ接合評価試験手法の比較,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン

14. 齊藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるストリップ型シリコンセンサー品質保証システムの構築,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
15. 石井達也：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの試験量産中の品質保証測定の結果,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
16. 中原瑳衣子：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XII,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
17. 前川群：COBAND 実験のための光学系設計開発 IV,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
18. 山根綾太：COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計 II,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
19. 北彩友海：新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の信号とクロストークの評価とシミュレーションによる動作原理の検証,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
20. 植田樹：新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の増幅層の放射線耐性に関する研究,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
21. 鈴木尚紀：SOI ピクセル検出器による KEK テストビームライン AR-TB 用望遠鏡システム構築,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年 3 月 12-15 日), オンライン
22. 中原瑳依子：COBAND 実験に向けた極低温高利得電荷積分型前置増幅器の性能評価,
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日), オンライン
23. 前川群：COBAND 実験のためのロケット搭載型遠赤外光学素子の設計開発,
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日), オンライン
24. 山根綾太：COBAND 実験遠赤外線光学系における集光器と反射防止膜設計,
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 23 日), オンライン
25. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,
第 3 回観測ロケットシンポジウム, JAXA/ISAS(2021 年 3 月 24-25 日), オンライン
26. 武内勇司：Study of Hf-STJ for single X-ray photon detector,
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン
27. Shigeki Hirose : Production of ATLAS ITK silicon detectors - Japanese Contribution
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン
28. Hisanori Suzuki : Development of a telescope system based on SOI pixel technology for the KEK test beamline AR-TB
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 29 日), オンライン

29. 原和彦：素粒子実験でのシリコン検出器
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
30. 山内大輝：LHC-ATLAS 実験におけるトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
31. 植田 樹：新型 LGAD 飛跡検出器 (ACLGAD) の細密化と放射線耐性に関する研究
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
32. 齊藤 功太：HL-LHC ATLAS 実験用ストリップ型シリコンセンサー本生産に向けた品質保証システムの改良
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
33. 石井達也：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの試験量産中の品質保証に関する測定
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
34. 熊倉泰成：読み出し試験および形状測定による HL-LHC ATLAS シリコンピクセル検出器のバンブ接合品質評価
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
35. 村田仁慈：HL-LHC ATLAS 実験用 pixel センサーの量産に向けた品質テストの体制
筑波大学宇宙研究センター 2020 年度ワークショップ (2021 年 3 月 30 日), オンライン
36. Takashi Iida, 「(ポスター発表) Water-based liquid scintillator using fluorochemical surfactant」,
「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2020 (2020 年 12 月 21-22 日), オンライン

(国際会議・研究会)

1. Kazuhiko Hara, “Welcome and Introduction to VERTEX2020”,
29th Workshop on Vertex Detectors (VERTEX2020), online, October 5-8, 2020.
2. Takashi Iida, 「(招待講演) “Lecture on Neutrino-less double beta decay”」,
Vietnam School on Neutrinos (VSON) 2020 @Online, Dec. 12 - Dec. 17, 2020

〈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 3 月

1. 佐藤 勝哉：HL-LHC ATLAS 実験に向けたクアッド型ピクセルセンサーの性能評価,
2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
2. 中原瑳衣子：COBAND 実験に向けた極低温高利得電荷積分型前置増幅器の性能評価,
2020 年度修士論文 (2021 年 2 月)
3. 前川群：COBAND 実験のためのロケット搭載型遠赤外光学素子の設計開発, 2020 年
度修士論文 (2021 年 2 月)