

## 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	16名
学群4年次生	4名

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

### 【1】 LHC ATLAS 実験

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

2021 年度は、LHC 加速器と ATLAS 実験は、2022 年から始まる Run-3 運転に備え、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。筑波大学グループでは、シリコンストリップ検出器の運転を行っており、また 2029 年からの HL-LHC 実験に向けたシリコン検出器の開発も行って来ている。

#### (1) LHC-ATLAS 実験の状況と将来計画

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  $4.57 \text{ fb}^{-1}$ 、 $20.3 \text{ fb}^{-1}$ 、Run-2 では 13 TeV のデータを  $139 \text{ fb}^{-1}$  取得した。

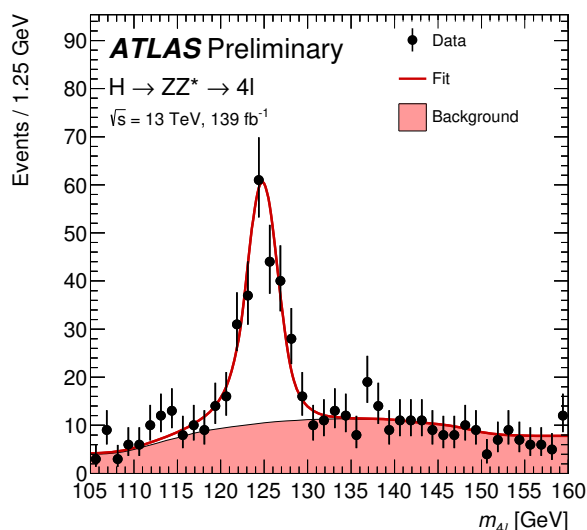


図 1:  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  崩壊チャンネルでの 4 つのレプトンの不変質量の分布。フィットの結果が赤線で示されている。赤く塗った領域は、バックグラウンドの寄与を表している。

2019 年から 2021 年の間は、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中であった。シャットダウン中の 2020 年にコロナウィルスのパンデミックが起り、当初 2021 年度から開始予定であった Run-3 の 1 年間の後ろ倒しが決定した。2020 年には、CERN は研究所の運営に必要最低限の人員のみに入構を絞った時期もあったが、2021 年度にはウィズ・コロナの生活形態の容認が広まるとともに、CERN における入構制限も平時に近づきつつある。

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、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が主な作業である。作業は概ね順調に進んでおり、本稿執筆中の 2022 年 6 月には、アップグレードしたシステムのコミッショニングを行いながら Run-3 の陽子・陽子衝突に備えている最中である。

今後は、2022-2025 年に Run-3 実験を行い、重心系エネルギー 13.6 ~ 14 TeV でさらに  $300 \text{ fb}^{-1}$  の陽子・陽子衝突データを蓄積する予定である。2026-2028 年には、再び加速器と検出器のアップグレードが予定されており、2029 年からは瞬間輝度を Run-3 の 2.5 倍に上げる HL-LHC 実験が開始される。10 年間かけて  $3000 \text{ fb}^{-1}$  の大規模データセットを取得する計画である。

## (2) ヒッグス粒子の精密測定

標準理論の最後の未発見粒子であったヒッグス粒子は、ATLAS および CMS 両実験により、2012 年に LHC 加速器での陽子・陽子衝突データを用いて発見された。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。ATLAS 実験では、ヒッグス粒子のさまざまな性質を、データの増加

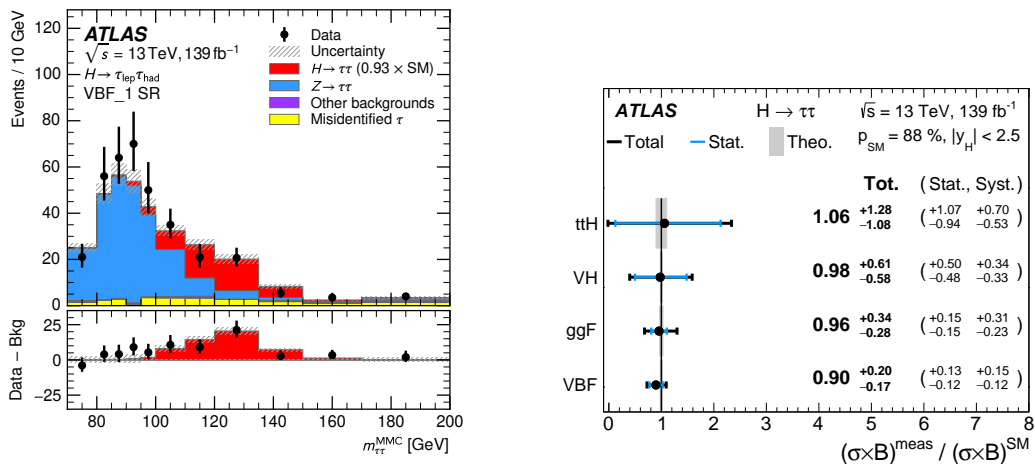


図 2: (左) ヒッグス粒子が  $VH$  またはベクトル・ボソン融合過程で生成され、 $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊したと考えられる候補事象での、2 個の  $\tau$  粒子の不変質量分布。(右)  $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊事象を使って測定した 4 種類のヒッグス粒子生成過程の信号強度。どの過程の測定結果も、標準理論とよく一致している。

とともに精度を上げて測定を更新している。本節では、ヒッグス粒子の精密測定のうち、重要な結果をいくつか紹介する。

2020 年春には、 $139 \text{ fb}^{-1}$  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  $124.92^{+0.21}_{-0.20} \text{ GeV}/c^2$  と測定された。図 1 にこの解析での不変質量分布を示す。

ATLAS と CMS の解析結果をコンバインし、ヒッグス粒子の質量の世界平均は、 $125.25 \pm 0.17 \text{ GeV}/c^2$  が得られている。

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、 $5\sigma$  以上の有意度で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、LHC での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。

すでに発見されているヒッグス粒子の生成・崩壊チャンネルをより精密に測定することで、標準理論を高い精度で検証することが重要である。2021 年度には、重心系エネルギー  $13 \text{ TeV}$  の  $139 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用い、 $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊チャンネルの生成断面積測定をアップデートした。図 2 にヒッグス粒子が  $VH$  またはベクトル・ボソン融合過程で生成され  $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊

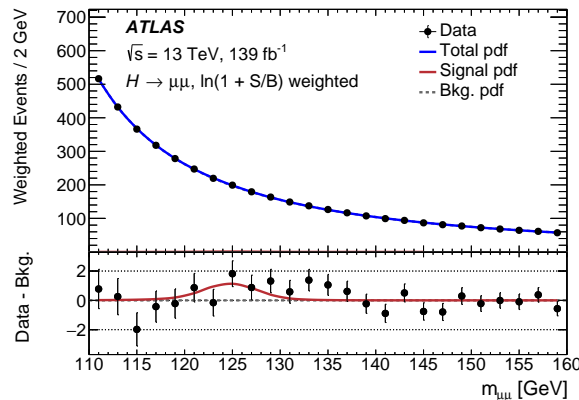


図 3: ATLAS 実験での  $H \rightarrow \mu\mu$  の崩壊過程の探索解析での 2 つの  $\mu$  粒子の不変質量分布。フィットで得られた信号とバックグラウンドの寄与を  $S$  と  $B$  とし、候補事象に  $\ln(1 + S/B)$  の重みをかけてヒストグラムにした。下部パネルは、分布からバックグラウンドの寄与を差し引いた図である。

した事象の 2 個の  $\tau$  粒子の不変質量分布と、 $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊した事象を解析することで得られたさまざまなヒッグス粒子生成過程の信号強度を示す。重心系エネルギー 13 TeV の陽子・陽子衝突における  $pp \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$  過程の生成断面積は、 $2.65 \pm 0.41$  (stat)  $^{+0.91}_{-0.67}$  (syst) pb と測定された。この値は、標準理論の予言値  $3.17 \pm 0.09$  pb とよく一致している。

LHC では、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べく、研究に取り組んでいる。2020 年に ATLAS 実験では、 $139 \text{ fb}^{-1}$  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。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 3 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  $\mu$  粒子の不変質量分布を示す。信号強度  $\mu$  は、 $\mu = 1.2 \pm 0.6$  と測定され、 $H \rightarrow \mu\mu$  信号の有意度は  $2\sigma$  であった。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、 $3\sigma$  の有意度で信号の兆候が確認されたと報告されている。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。2021 年度には、 $139 \text{ fb}^{-1}$  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。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $ZZ^*$ 、 $WW^*$ 、 $\tau\tau$ 、 $b\bar{b}$ 、 $\mu\mu$ 、 $Z\gamma$  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。2020 年の複合結果から、 $H \rightarrow Z\gamma$  過程の解析結果が新たにコンバインに加わった。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



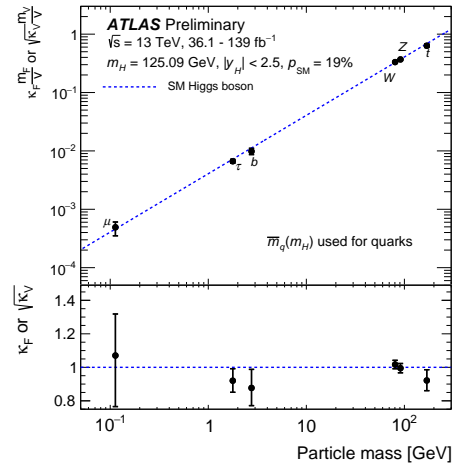
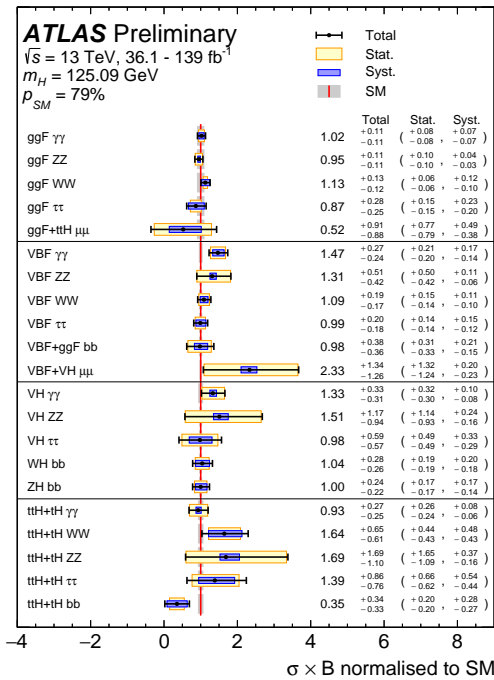


図 4: ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子測定の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して測定された信号強度。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を粒子の質量の関数としてプロットしている。フェルミオンに対しては測定された湯川結合を、ボソンに対しては標準理論の予言がフェルミオンに対する予言と同じ直線に乗るように次元を合わせてプロットしている。下部のパネルは、測定結果と標準理論予言値の比を表示している。

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 5 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。

### (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 6 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。

ATLAS 実験では  $36 \text{ fb}^{-1}$  のデータを使用し、ヒッグス粒子が 2 つ同時に生成される事象を、 $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ ,  $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ ,  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ ,  $HH \rightarrow W^+W^-W^+W^-$ ,  $HH \rightarrow W^+W^-\gamma\gamma$ ,  $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$  の各崩壊モードで探索した解析結果を 2019 年に公表していた。その後、Run-2 の全  $139 \text{ fb}^{-1}$  のデータを解析して 2 ヒッグス事象の探索解析をアップデートしてい

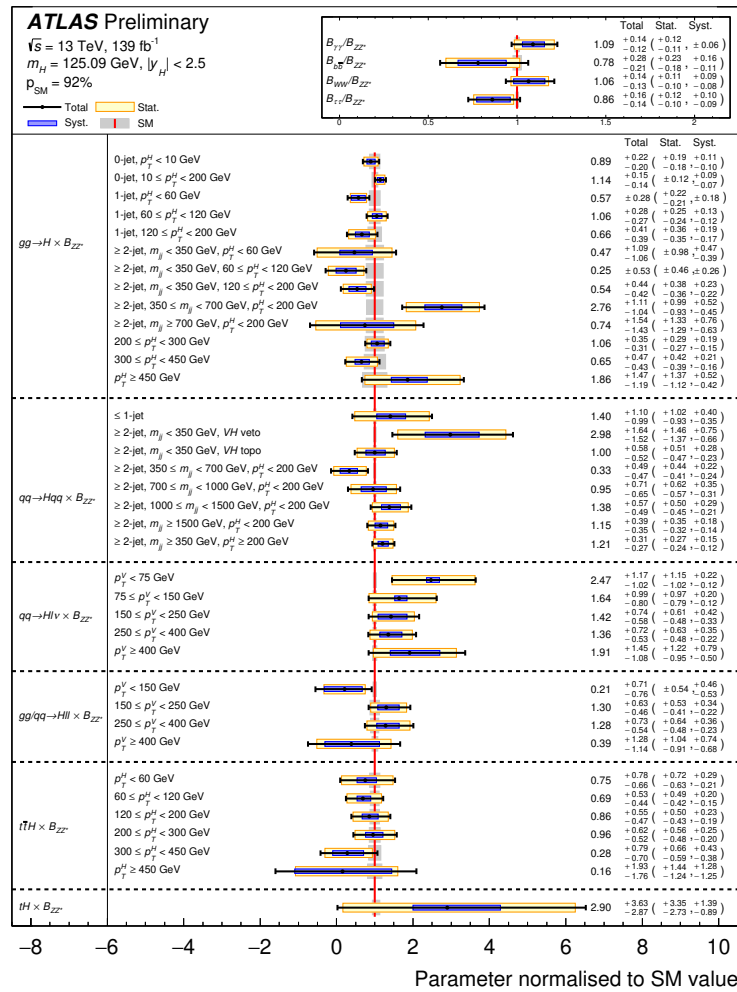


図 5: ヒッグス粒子生成過程の運動学的な領域ごとの生成断面積の測定結果。

るところである。2020年には $HH \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$ 解析を、2021年には $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ および $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ の解析をアップデートした。3チャンネルとも、データ内に有意な信号の寄与が確認されなかった。図7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。 $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ と $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ のそれぞれの解析チャンネルでは、すでに単独で $36 \text{ fb}^{-1}$ を使用した全解析をコンバインした結果よりも高い感度で探索がなされている。他の解析チャンネルも現在Run-2全データを使って解析を行っており、それら結果が揃った段階で、新しく全チャンネルのコンビネーションが行われる予定である。多くのデータを蓄積し、2ヒッグス事象の発見と、ヒッグス粒子の自己相互作用の測定を行うことは、標準理論の新しい一面を検証することになるため重要であり、Run-3とそれに続くHL-LHCでの重要課題である。

#### (4) 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索

標準理論では、ヒッグス場としてアイソスピン・ダブレットを1個導入し、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。ヒッグス場にアイソスピン・ダブレット2個を

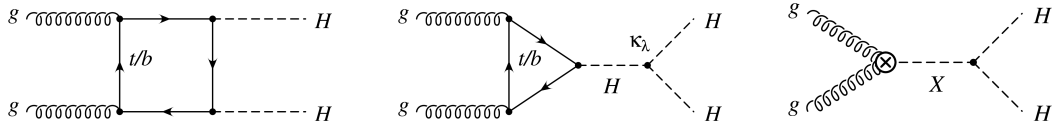


図 6: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子  $X$  が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

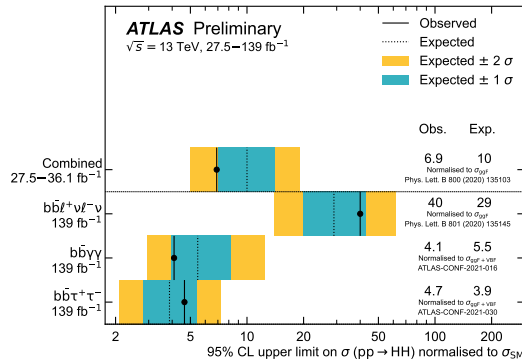


図 7: 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。解析チャンネルごとに得られた上限を、標準理論の予言値で規格化して表示している。

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  $h_{\text{MSSM}}$  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。

2021 年には、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  $h_{\text{MSSM}}$  シナリオのパラメータに対する棄却域を図 8 に示す。

ATLAS 実験におけるさまざまな重いヒッグス粒子の直接探索解析によって得られた  $h_{\text{MSSM}}$  シナリオに対する棄却領域をまとめたのが図 9 である。

## 【2】 ATLAS シリコンストリップ検出器の運転

筑波大グループでは、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、重要な貢献を続けてきた。これまで 10 年以上にわたって LHC の厳しい実験環境下で運転されてきた SCT センサーは、大きな放射線損傷を受けており、例えば漏れ電流は運転開始当初の約 10,000 倍にまで増加している。したがって、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理解しておくことは、これからはじまる

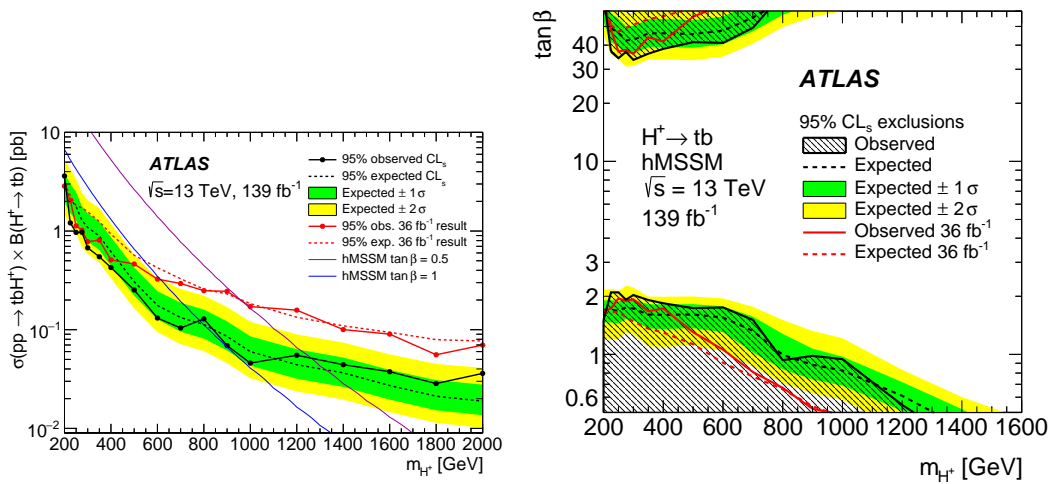


図 8:  $H^\pm \rightarrow tb$  崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索結果。比較のために  $36 \text{ fb}^{-1}$  のデータによる結果を赤線で示している。(左) 荷電ヒッグス粒子の質量の関数として得られた生成断面積の上限値。(右)  $hMSSM$  シナリオに対する制約。

Run 3 運転にむけて重要なインプットとなる。

ATLAS 実験の環境において、SCT センサーに入射する粒子の多くは陽子または中性子であるため、シリコンセンサーのバルク部に作られる講師欠陥が、主要な放射線損傷の寄与であり、特に漏れ電流が増大する。漏れ電流は温度に非常に敏感なため、その正確な測定にはセンサー温度の情報も重要であるが、SCT 運用中は信号処理用 ASIC などからの発熱により、シリコンモジュール上で測定される温度 (モジュール温度、 $T_{\text{mod}}$ ) は真のセンサー温度 ( $T_{\text{sensor}}$ ) よりも高くなる。そこで、以下の手法によりモジュール温度とセンサー温度の温度差  $\delta T$  を見積もった。測定結果を図 10(左) に示す。

1. ASIC への電源を切り、シリコンセンサーにバイアス電圧をかける。このとき、ASIC からの発熱がないため、 $T_{\text{mod}} = T_{\text{sensor}}$  とみなせる。
2. SCT の冷却温度を約  $-20^\circ\text{C}$  から約  $0^\circ\text{C}$  まで変えながら、モジュール温度と漏れ電流との関係を測定する。これにより、図 10(左) 中に青線で示された関係が得られる。
3. ASIC への電源を入れて発熱させる ( $T_{\text{sensor}} < T_{\text{mod}}$ )。一定時間経過して熱平衡状態になった後、再度モジュール温度と漏れ電流の関係を測定する。

この測定は、LHC が停止している時間を利用して行う。よって測定中の放射線量はゼロであるため、新しい放射線損傷が生じることはなく、したがって漏れ電流はシリコンセンサーの温度によってのみ決まる。よって、図 10(左) の青を使うことで、漏れ電流から  $T_{\text{sensor}}$  を逆算でき、温度差  $\delta T = T_{\text{mod}} - T_{\text{sensor}}$  が決まる。SCT 運用中は  $T_{\text{mod}}$  のみがモニターされていたわけだが、本手法で求めた  $\delta T$  を使うことで、対応する  $T_{\text{sensor}}$  が求められるようになり、さらにそこから  $0^\circ\text{C}$  に換算した漏れ電流を正確に計算し、様々な比較をすることが可能になった。 $0^\circ$  換算した漏れ電流の、Run 2 運転中の推移を示したものが図 10(右) であり、ハンプルグモデルと不定性の範囲で一致し、漏れ電流の特性がよく理解できていることが示された。

SCT で使われているシリコンストリップセンサーは、 $n$  型シリコンでできたバルク部にアクセプターを打ち込んで  $p$  型ストリップを形成した構造である。バルク損傷が進むと、実

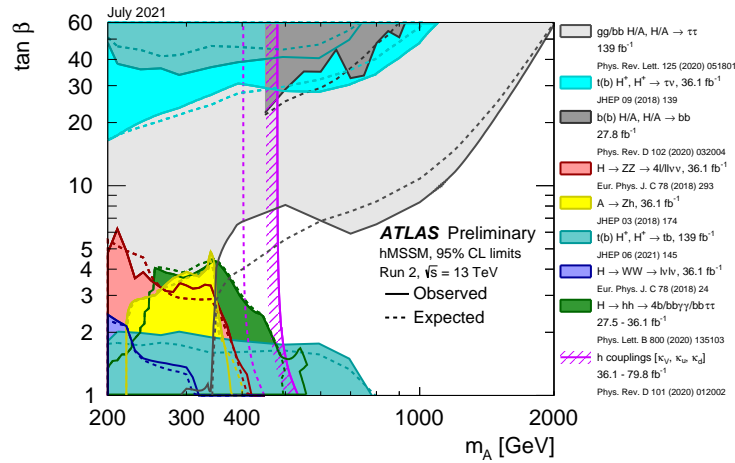


図 9: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、hMSSM シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見された 125 GeV/c<sup>2</sup> のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

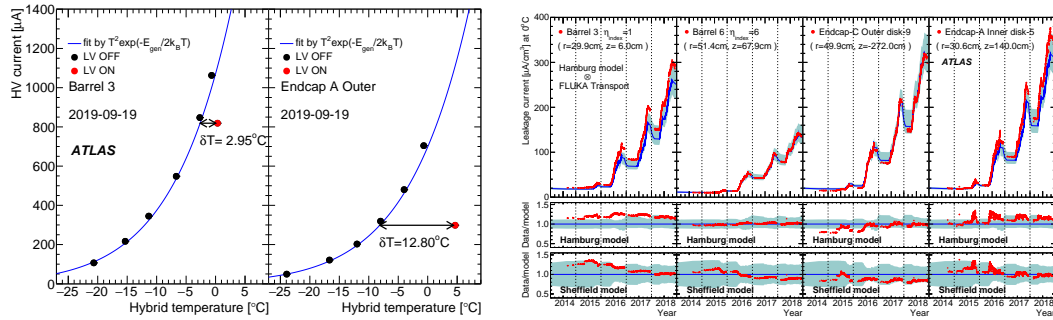


図 10: (左) モジュール上で測定された温度 (Hybrid temperature) と漏れ電流 (HV current) の関係を測定した結果。左はバレル部、右はエンドキャップ部の、それぞれ代表的なモジュールにおける測定結果を示す。黒点は ASIC に対する電圧 (LV) が OFF の状態で測定した結果、赤点は典型的な SCT 運転時の冷却温度において LV が ON の状態で測定した結果に対応する。(右) 温度 0°C に換算した漏れ電流の、2014 年から 2018 年までの時間経過。放射線量や形状が異なる 4 個のモジュールにおける結果を示す。赤点がデータによる実測値、エラーバンド付きの青線はハンブルクモデルにもとづいた予測値である。Run 2 運転におけるデータ収集が本格化した 2016 年以降、最大で毎年約 100 μA/cm<sup>2</sup> ずつ漏れ電流が上昇していった様子がわかる。

効的なアクセプター濃度が上昇してバルクが *p* 型に“型変換”を起こし、型変換後には印加電圧に応じて裏面からストリップ側に向かって空乏化が進むようになる。現在の SCT は既にすべてのセンサーが型変換を起こしていると考えられ、したがって常に完全空乏化電圧よりも十分に高いバイアス電圧を印加しなければ、荷電粒子検出効率が低下してしまう。今後始まる Run 3 運転では、放射線量に応じて完全空乏化電圧が上昇していくため、現在の状態や今後の推移を正確に予測しておくことは、SCT の安全な Run 3 運転に向けて重要となる。完全空乏化電圧  $V_{FD}$  は、図 11 に示すような漏れ電流のバイアス電圧依存性から見積もられる。漏れ電流は空乏化した体積に比例するため、低電圧領域 ( $V < V_{FD}$ ) では、漏れ電流が線形で増加する。バルク部が完全に空乏化した後は、それ以上空乏層体積は増えないため、一定値を取る (実際には表面電流の増加により、緩やかに上昇する)。したがって、図 11 (左) に見られる漏れ電流の増加傾向の変化点から、 $V_{FD}$  の値を推定することができる。

このようにして見積もった完全空乏化電圧の時間発展を図 11 (右) に示した。データによる測定値は、ハンブルクモデルで予測された完全空乏化電圧の増加および減少傾向に追従



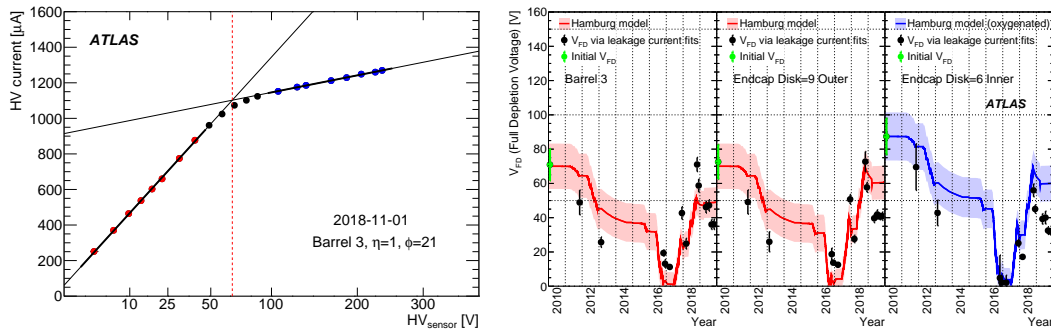


図 11: (左) 漏れ電流 (HV current) のバイアス電圧 (HV<sub>sensor</sub>) 依存性の一例。赤丸および青丸で示されたそれぞれの区間でフィットした直線同士の交点 (赤点線) の値を、完全空乏化電圧の見積もりとする。(右) 見積もられた完全空乏化電圧の、2010 年から 2019 年までの時間経過。放射線量や形状が異なる 3 個のモジュールにおける結果を代表例として示す。黒点が実測値、エラーバンド付きの赤もしくは青線はハンブルクモデルにもとづいた予測値である。

しており、2016 年ごろに起きた型変換による完全空乏化電圧も、測定結果によく表れている。一方で、2018 年終わりから 2019 年初めにかけての完全空乏化電圧の減少傾向が実データでかなり大きく出ている点など、予測と一致しない点も見受けられる。これらの違いについて、現在も詳細な解析を続けている。

これら一連の、シリコンストリップセンサーに対する放射線損傷にかんする研究に加え、Run 2 運転中におけるデータ収集システムの改良や高輝度環境への対応をまとめた論文が、2022 年 1 月に Journal of Instrumentation より出版された。

2019 年から 3 年間続いた長期シャットダウン期間中は終わりに近づき、2021 年終盤にはいよいよ Run 3 運転 (2022–2025 年) に向けた、ATLAS 検出器全体でのコミショニングが始まった。11 月には、LHC のビームを ATLAS 検出器上流のコリメータに意図的に衝突させ、大量の二次粒子を ATLAS 検出器全体に入射させる「ビームスプラッシュ」が実施された (図 12)。これは、検出器各パートの動作確認や、信号タイミングの同期確認などのために行われる。このとき SCT は、大きな信号電流による破損を防ぐため、電源を落とした安全な状態に維持されていたが、ATLAS 検出器 Run 3 運転にむけた、非常に重要なマイルストーンとなった。

この長期シャットダウン期間中、SCT に対する大きなアップグレードは行っておらず、Run 2 運転終了時の状態をほぼそのまま Run 3 に引き継ぐ。ただし、故障部品の交換や、ATLAS 中央データ収集システムとのインタフェースを担うボードの更新、シリコンモジュールと後段信号処理ボードとの間の配線変更など、細かい改良や変更があったため、ATLAS 検出器コミショニング初期にその正常な動作を確認する必要がある。現在は、主に宇宙線信号による SCT の基礎性能や動作チェック、他検出器との同期状態の確認が進められている。

### [3] HL-LHC ATLAS 実験用シリコン飛跡検出器の開発

2029 年より、LHC は瞬間ルミノシティを  $7.5 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$  に引き上げた高輝度運転に入る (High-Luminosity LHC)。劇的に増加するデータ量および放射線量に対応するため、現行 ATLAS 検出器に対する大幅なアップグレードが予定されており、SCT を含めた内部飛跡検出器は、新しいシリコン飛跡検出器である Inner Tracker (ITk) に置き換えられる。バレル部は全 9 層で構成され、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



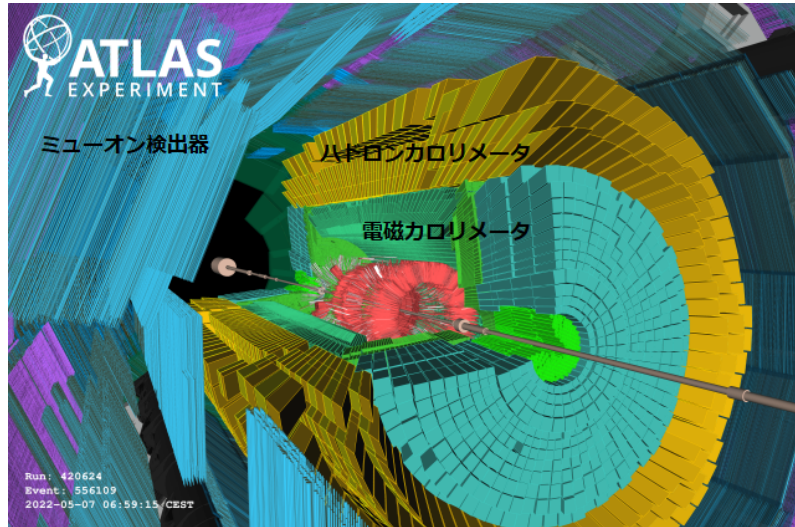


図 12: ビームブラッシュ時のイベントディスプレイ。ミューオン検出器やカロリメータのほぼすべてのチャンネルにおいて、二次粒子に由来する信号が検出されている。

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  $\text{m}^2$  もの体積をもつ世界最大級のシリコン飛跡検出器であり、2028年の完成を目指していよいよシリコンセンサー量産、および実機シリコンモジュールの量産を開始するフェーズに入りつつある。筑波大では、主にシリコンストリップおよびシリコンピクセルセンサーの量産時性能評価、およびピクセルモジュールの開発を、国内外の大学および研究機関と協力しながら進めている。

#### (1) シリコンストリップセンサー量産

ITk用シリコンストリップセンサー量産の中で、筑波大では高エネルギー加速器研究機構と共同で

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

を担当している。2021年7月より、本番用シリコンストリップセンサーの量産が始まった。図13（左）には、ストリップセンサー品質保証測定および納入枚数の推移を示した。量産開始当初に遅れが見られたが、徐々に遅れを取り戻し、最終的に2021年度納入予定であった1,784枚の全数の品質保証が完了、納入された。今後、約3年にわたり、合計20,000枚以上（日本担当分は6,000枚以上）のシリコンストリップセンサーを量産予定である。

品質保証測定はすべて製造元の浜松ホトニクスとの協力のもと、浜松ホトニクス社内で行われるが、特に我々は形状測定の測定状況をリモートで監視、および問題発生時の対処を行う必要がある。量産開始当初は高い頻度での問題発生があり、その都度筑波大の担当者が復旧手順を踏む必要があった。これらの問題に対し、自動エラー復旧プログラムや、深刻な問題発生時の自動通知機能を実装するなど、地道な改良を重ね、年度後半には効率的な測定を実現した。

放射線耐性試験では、ストリップセンサーと同じウェハー上に形成された試験用構造体（テストチップ、8 mm 角ミニダイオードおよび10 mm 角ミニストリップセンサー）を用

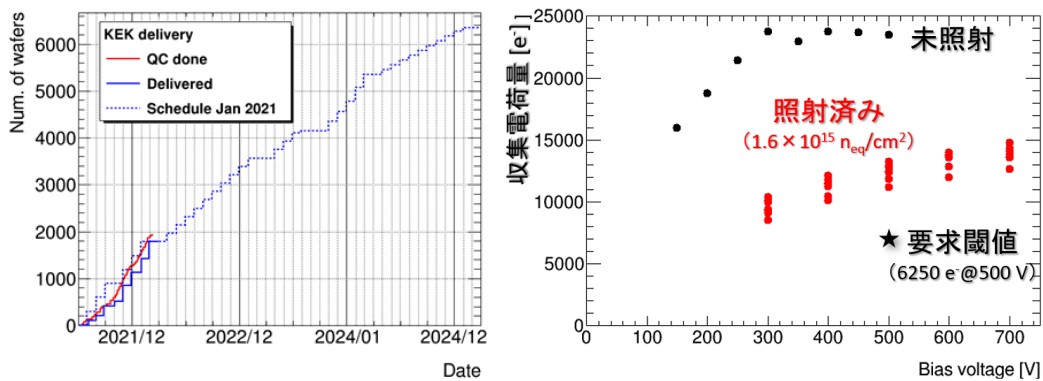


図 13: (左) シリコンストリップセンサー量産中の品質保証測定枚数 (赤実線) および納入枚数 (青実線) の推移 (日本担当分)。青点線は量産開始当初の納入予定曲線を示す。(右) 収集電荷量測定結果のバイアス電圧依存性。赤点は 6 枚のミニセンサーに対して  $1.6 \times 10^{15}$  1-MeV  $n/cm^2$  を照射した後に得られた結果を、黒点は未照射サンプルで得られた結果を示す。要求閾値 (500 V 印加時に  $6250e^-$  以上) に対して、十分な量の電荷量が得られていることがわかる。

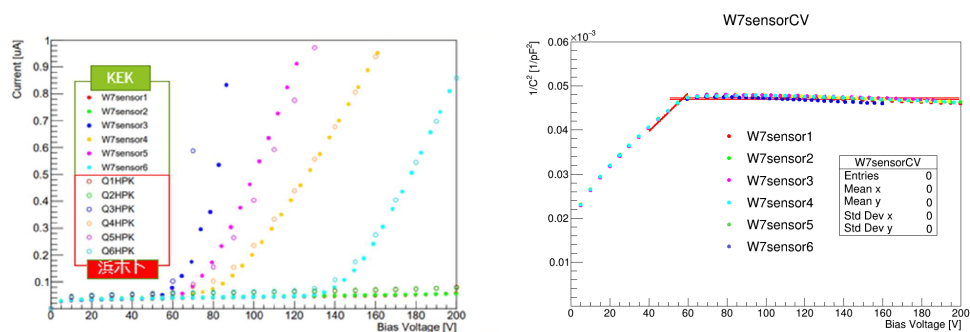


図 14: 事前量産ピクセルセンサーの (左) 電流電圧特性と (右) 容量電圧特性の測定結果。左図の白抜き点で示されたデータは製造元での出荷時測定結果で、比較用に示している。この測定結果には、測定システム検証のために特性が悪いピクセルセンサーを含めており、140 V 以下でブレイクダウンを起こしているピクセルセンサーが該当する。

いる。2021 年 12 月に、本量産では初めての陽子ビーム照射試験を、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) にて実施した。図 13 (右) は、 $1.6 \times 10^{15}$  1-MeV  $n/cm^2$  相当の陽子を照射したミニセンサー 6 枚を測定した結果を示す。この照射量は、高輝度 LHC-ATLAS 運転全期間において予想される放射線量の 1.5 倍に相当する。これだけの放射線を受けた後も、500 V 印加時にすべてのサンプルが約  $12,000e^-$  の収集電荷量を示し、これは要求閾値よりも十分に高い。このほかに、ポリシリコンバイアス抵抗値やストリップ間静電容量など、合計 8 項目を測定し、いずれも良好な結果を確認した。

## (2) シリコンピクセルセンサー量産および試作モジュール性能評価

ITk 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) がシリコンピクセルセンサーの性能評価からモジュール製造までを一貫して担当する。2021 年度は、ピクセルモジュール量産に向けて、様々な進展があった。

まず、本番用ピクセルセンサーの事前量産として、170 枚のセンサーを生産、その特性安定性を検証するとともに、量産時にピクセルセンサーの基礎特性を迅速に測定できる、プローバーを用いたシステムの開発を進めた。図 14 には、電流電圧特性および容量電圧特性

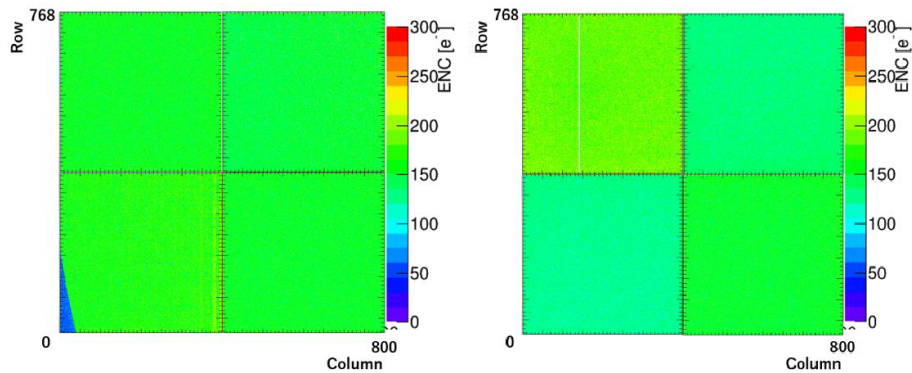


図 15: ITkpix-v1 モジュールに対し、サーマルサイクルを 100 回繰り返した後に得られたノイズマップ。左図がパリレン済みモジュール、右図が非パリレンモジュールに対応する。左図には、バンプボンディングがはがれ、センサー起因のノイズが見えなくなった分、ノイズが低下し青く見えている領域がある。

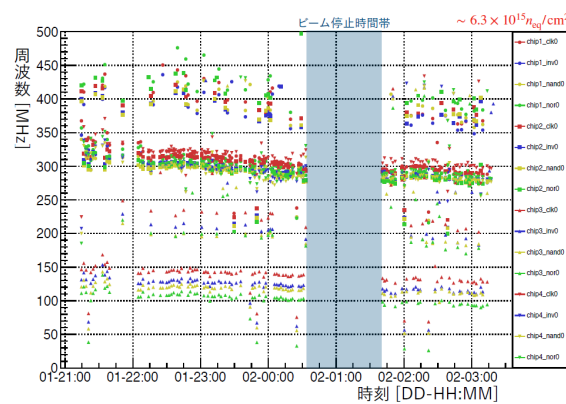


図 16: 陽子ビーム照射中のリングオシレータ周波数の時間変化。

の測定結果を示す。電流電圧特性の測定結果からは、製造元である浜松ホトニクスでの出荷時測定とおおむね一致する結果を確認できた。容量電圧特性では、完全空乏化電圧が 60 V 前後と、期待通りの結果であることを確認した。これらのピクセルセンサーは、ピクセルモジュールの事前量産に使用される。

また、実機に用いられる信号処理用 ASIC の試作バージョンである、ITkpix-v1 を 4 枚搭載したシリコンモジュールを、初めて製作した。より小型な試作ピクセルモジュールによる検証において、 $-55^{\circ}\text{C}$  から  $+60^{\circ}\text{C}$  (実際の実験環境で可能性のある最大の温度変化) の温度変化を続けると、ストレスによりピクセルセンサーと ASIC との接続 (バンプボンディング) が徐々にはがれてしまうことがあった。これは、ピクセルモジュール表面をパリレンによってコーティング処理することで抑制できることも示唆されていたが、2021 年度には、実機仕様に非常に近い ITkpix-v1 モジュールについて、パリレンコーティングを施したもの (パリレン済みモジュール) と施していないもの (非パリレンモジュール) を用意し、 $-55^{\circ}\text{C}$  から  $+60^{\circ}\text{C}$  のサーマルサイクルを繰り返すことで、そのバンプ強度を検証した。図 15 に示すように、ITkpix-v1 モジュールにおいても、パリレン済みモジュールではバンプボンディングのはがれが起きないことが確認された。2022 年度前半には、20 台以上のパリレン済みモジュールを試作、サーマルサイクル試験を繰り返してその強度の担保を目指す。

これらの ITkpix-v1 モジュールの一部に、東北大学 CYRIC において  $6.3 \times 10^{15}$  1-MeV  $n/\text{cm}^2$  相当の陽子照射を行った。特に 2022 年 3 月の照射試験では、陽子照射中にデータを読み出



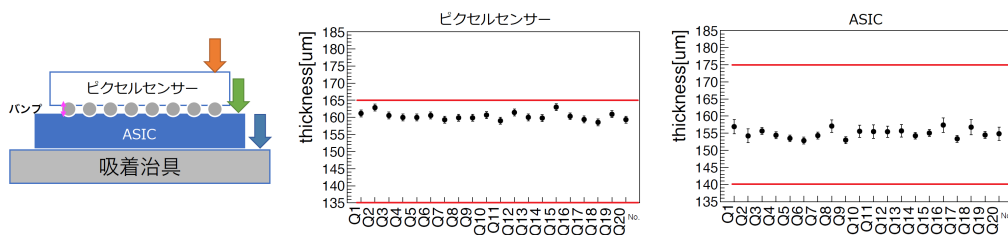


図 17: (左) ベアモジュールの断面図。ベアモジュール縁の、矢印で示された部分にあるセンサーと ASIC の段差を利用することで、センサー部と ASIC 部それぞれの厚みを測定する。(中) センサー部の測定結果。(右) ASIC 部の測定結果。それぞれ、赤線内側が厚みに対する要求値である。

し、その特性をリアルタイムに測定することに成功した。図 16 はリングオシレータの周波数を示し、照射量に応じて 50 MHz 程度の低下が見られた。これは別施設で行われた照射結果と同等で、リングオシレータ周波数が、ピクセルモジュールが受けた放射線量のモニターとして利用できる可能性を示した。陽子照射後のピクセルモジュールは、漏れ電流が劇的に増加しているため、動作試験時に十分に冷却しなければ破損してしまう可能性がある。照射済みピクセルモジュールの動作試験を安全に実施するため、ペルチェ素子と真空吸着治具を用いた冷却システムを設計、製作した。この装置を  $-45^{\circ}\text{C}$  に冷却した恒温槽内に設置したうえでピクセルモジュールを冷却することで、モジュール温度を  $-35^{\circ}\text{C}$  に安定して保つことに成功した。今後、陽子照射済みモジュールの特性を詳細に調査する。

ピクセルモジュールの量産過程において、各工程が終了する都度形状を精密に測定し、破損や反りなどが発生していないかを確認する必要がある。形状測定には、オートフォーカスによる非接触形状測定装置を用いる。2021 年度には、ベアモジュールと呼ばれる、ピクセルセンサーと ASIC が貼り合わされた状態のモジュールの形状測定手法を確立した。この手法の中では、図 17 (左) のように、ベアモジュールの“縁”を利用することで、単にベアモジュール全体の形状を測定するだけでなく、ピクセルセンサー部と ASIC 部それぞれの厚みも測定できるようになった。合計 20 枚のベアモジュールに対して厚み測定を行った結果は図 17 (中) および (右) に示した通りで、すべてが十分に要求値以内であることを確認した。このようなベアモジュールに、電源供給や信号入出力に必要な表面実装部品が搭載されたフレキシブル基板を貼り付けることで、ピクセルモジュールが完成する。この状態のモジュールは、表面に構造物が非常に多く、オートフォーカスの焦点合わせに時間がかかったり、測定に失敗することがある。そのような問題を回避するよう、測定位置や点数を最適化し、測定精度を損なうことなく、1 モジュール当たりの測定時間をこれまでの 43 分から 25 分に大幅に短縮した。2021 年度に確立したベアモジュールおよびピクセルモジュールの形状測定手順を用い、今後の量産においてピクセルモジュールの品質検査を行う予定である。

#### [4] COBAND 実験

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

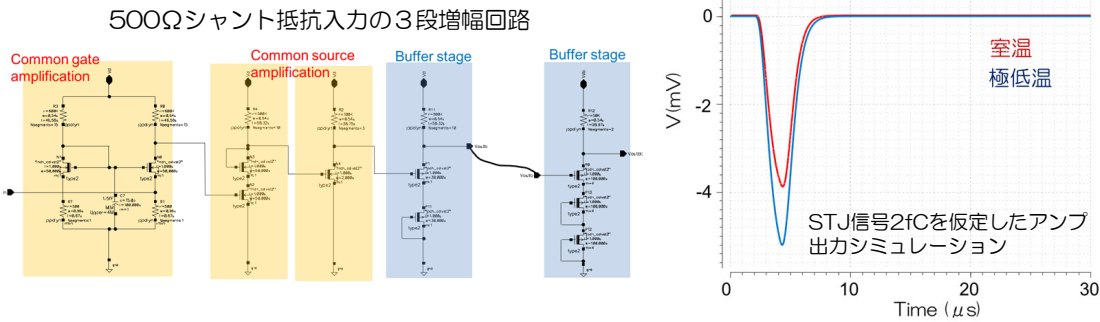


図 18: STJ 信号の読み出しに用いる前置増幅器として設計した回路 (左図)。SOI-MOSFET の極低温での特性変動を考慮した回路シミュレーションにおいて極低温動作をシミュレートした (右図)。

$T_c = 0.165 \text{ K}$ ) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

現在、産総研 CRAVITY 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 からの信号の読み出しは (a)0.4 mV 程度という微小で正確な定バイアス電圧が、長い冷凍機配線の先に接続された Nb/Al-STJ 素子を動作させるために必要、(b) 検出目標となるニュートリノ崩壊光の単一光子 ( $E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$ ) 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  $\mu$  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、そう単純ではなく、むしろチャレンジングと言える。そこで、我々のグループでは STJ 素子のすぐ近くで信号を増幅可能な読み出し系として 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の増幅読み出しや、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現された低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器を試作し、極低温での動作及び STJ 信号の電荷読み出し試験等の実績がある。これらによって得られた知見のもと、可視光 ~ 近赤外域の単一光子を十分に検出可能な性能をもつ増幅回路を設計し、SOI ウェハの MPW ランに参加して製作を依頼した。設計した回路は、(i) 0.5 k  $\Omega$  のシャント抵抗を入力としゲート接地段を初段に持つ 3 段増幅の電流電圧変換増幅器、(ii) カスコード型ミラー回路の差動増幅器をカスケード接続し 1 MHz 帯域までの高利得を確保したオペアンプの容量性負帰還による電荷積分型増幅器の二種類である。これらの回路では、回路内の MOSFET のゲート端子が外部に接続する箇所全てに ESD 保護回路を搭載させ、静電気による故障の可能性が低減することを期待した。また出力部にこれまでより電流駆動能力の高いバッファ回路を導入し、0.5 nF 程度ある冷凍機配線の寄生容量に対して 1 MHz 帯域までドライブ可能とした。(i) の電流電圧変換増幅器の回路、及び回路シミュレーション結果を図 18 に示す。このシミュレーションにおいて、入力信号として 2 fC (1 eV 相当のエネルギーに対する応答)、増幅器入力側の寄生容量 1 nF を仮定した。また出力側には、1 M  $\Omega$  の抵抗と 0.5 nF の出力負荷を仮定している。極低温下において、これまでの知見から MOSFET の閾値が 0.2 V 上昇、飽和電流が 1.5 倍、ポリシリコン抵抗が 8 % 上昇するというモデルを導入したシミュ

レーションを行い、極低温下でも動作するという結果を得た。

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 $^{55}\text{Fe}$ 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。

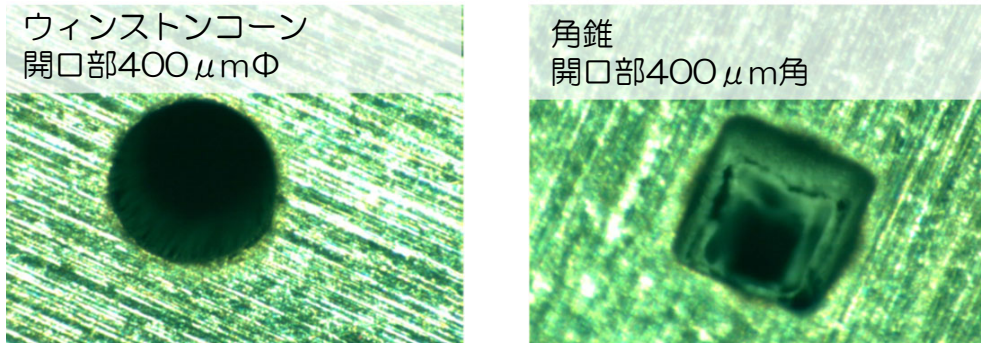


図 19: 光学シミュレーションの計算に基づき設計され、レーザーアブレーション法によりアルミ板上に形成されたサブミリサイズ集光器試作品の拡大写真。

Nb/Al-STJ + 極低温読出によって 25 meV の単一光子検出が実現すれば、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% 以下の単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  $\mu\text{m}$  域回折格子設計・製作、及び福井大の遠赤外線分子レーザーによる回折格子の性能を確認している。また、光学シミュレーションによる望遠鏡光学系の設計、及びミラーの一部の試作、並びに STJ 素子表面に施す反射防止膜として 10 ミクロン厚単結晶シリコン薄膜の試作を行った。

2021 年度における成果としては、反射防止膜最適化のため Nb や Hf の極低温・遠赤外域での光学定数測定 ( $n, k$ ) を目指し、予備測定として、室温・可視光 (波長 465 nm) での光学定数測定を自作の装置でのエリプソメトリ法により行った。また、望遠鏡光学系によって集光された光は、回折限界により焦点位置で 400 ミクロン  $\Phi$  の広がりを持つが、これを 40 ミクロン角 STJ 表面に集めるための集光器の試作を行った (図 19)。福井大遠赤外センターの遠赤外分子レーザー装置 (波長 47.6  $\mu\text{m}$ , 118.8  $\mu\text{m}$ ) を用いた室温環境下での集光器・反射防止膜・Nb 光学定数測定を 2022 年 3 月に実施している。

## 【5】 LGAD を用いた 4 次元飛跡検出器の開発

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの  $n^{++}$  電極の直下に高濃度の  $p^+$  層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能も飛躍的に向上する。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達成できる。高輝度 LHC (HL-LHC) やさらに高輝度の加速器実験 (FCC 等) では、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成が要求されるので、半導体検出器の優れた位置分解能に加え



時間情報を加えることができれば、重要な役割を果たすことが期待できる。可視光も検出できるようにする等で、生命科学への応用も視野にある。

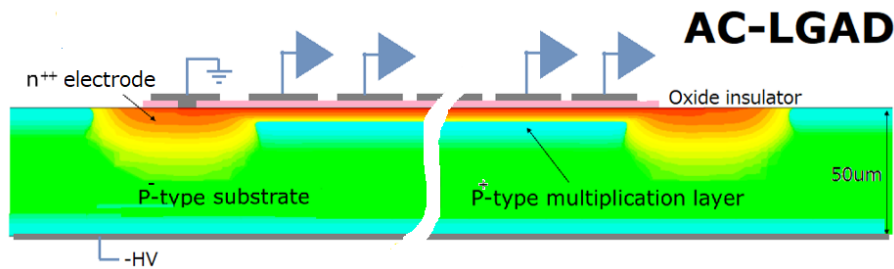


図 20: AC-LGAD 構造の概念図。一様な増幅層で生成される信号を酸化膜を介して細分化して配置した AC 電極から読み取る。

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 に採用されている。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る。増幅層と読み出し電極を酸化膜を介した AC 結合にする AC-LGAD の設計・試作を 2019 年度から開始した。図 20 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すぎて位置情報を失う傾向になるが、低すぎると増幅が十分でなくなる。2021 年度までに、 $n^{++}$  濃度、 $p^+$  濃度、酸化膜厚をパラメータとして浜松ホトニクスで 2 回の試作を実施し、 $\beta$  線や東北大 ELPH の電子ビーム、パルスレーザーを用いて評価を進めた。また、放射線耐性についても東北大 CYRIC の陽子線および QST 高崎研究所の  $^{60}\text{Co}$  照射を通じて評価した。

電極細分化は  $80\ \mu\text{m}$  ピッチに分割したストリップ型検出器で評価した。 $n^{++}$  濃度を低めにする事で、通過する  $\beta$  線に対して十分な信号ノイズ比を達成し、細分化した AC-LGAD が機能することを実証した。図 21 左には、東北大 ELPH 800 MeV/c 陽電子ビームを用いたストリップのヒット数分布をビームの位置を横軸に取って示している。色の違いは隣接するチャンネルであり、ビーム位置に従いヒットするチャンネルが変化している。ビーム位置の不定性を考慮すると  $80\ \mu\text{m}$  ピッチの AC-LGAD の位置分解能（バイナリ読出しの場合）は  $20.3 \pm 3.2\ \mu\text{m}$  となり、 $\text{pitch}/\sqrt{12}$  からの予想値と矛盾しない結果となった。位置分解能は荷電重心法をとることでさらに向上する。

将来の加速器実験で用いるには検出器の放射線耐性は不可欠である。CYRIC で  $1 \times 10^{15}\ \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  までの陽子線照射をした。図 21 右には、未照射、 $1 \times 10^{14}\ \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  および  $5 \times 10^{14}\ \text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  照射後での信号波高のバイアス電圧依存性を示す。陽子線照射によりアバランシェ増幅を開始する電圧が増加するが、照射後も増幅機構が保たれている。この測定により、陽子照射量に比例して増幅開始電圧が増加し、これは陽子によるアクセプター除去効果のために  $p^+$  ドープ密度が実効的に減少しているためと理解できる。この結果から、FCC などの将来の加速器では、衝突点から離れた位置であれば現設計が使用できるが、より内層に用いるために、耐圧設計を向上させる、あるいはアクセプター除去を抑制するなどの工夫が必要となる。

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。センサーの基本部分の開発研究が大きく進み、今後はピクセルサー設計の実用化検討に加えて、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。

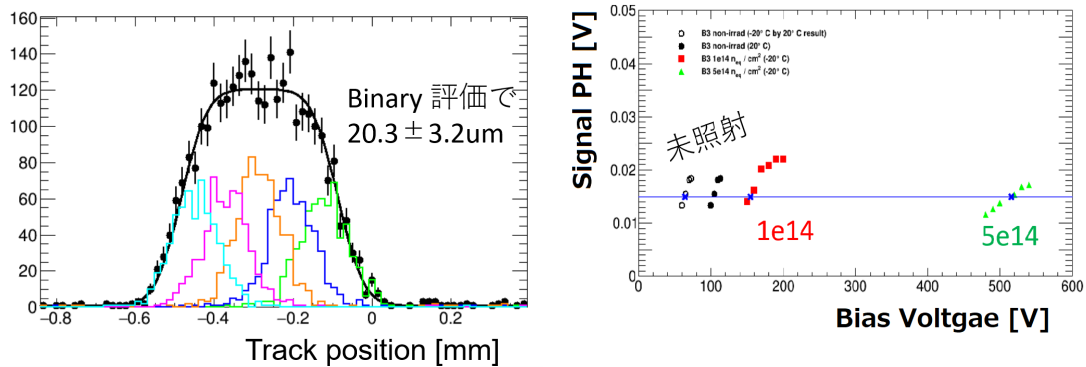


図 21: (左) ELPH の電子ビームを陽用いた  $80 \mu\text{m}$  ピッチのストリップ型 AC-LGAD のヒット数分布。色ヒストグラムは隣接するストリップ毎のヒット分布で黒は合計、(右) 信号波高の MPV 値のバイアス電圧依存性。未照射 ( $-20^\circ\text{C}$  および  $20^\circ\text{C}$  での測定) と陽子による  $1 \times 10^{14}$  および  $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  の陽子線照射後 ( $-20^\circ\text{C}$ ) での値。

## [6] 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する技術である。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きた。

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きた。2019 年度から開始した PDD をもつセンサーの放射線耐性評価を完了し、結果は IEEE 国際会議で報告した。また、国際リニア衝突器 ILC (International Linear Collider) 実験用にマイクロ金バンプを用いた 3 次元積層 SOFIST センサーを開発してきたが、2021 年度は積分型 INTPIX4 を用いて GeV 電子ビームで高位置分解能実現可能なトラッカーを開発し、SOFIST の低消費電力化にむけた新センサーのビーム試験の準備を行った。

### (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することで、検出器容量を増やすことなく読み出しピクセルに流入する暗電流を抑制し、ピクセル全領域にわたり電荷収集効率を向上させ、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。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線照射や陽子照射を実施し、暗電流増加の原因を探った。暗電流はバルク部損傷、Si-酸化膜界面トラップの電荷、酸化膜中のトラップ電荷により増加するが、これらの寄与を分離評価する手法を確立した。2 種類のトラップ電荷を個別に評価するために、埋め込み酸化膜 (BOX) をゲート酸化膜とする FET をピクセルセンサー同一素子に作製し、同時に照射した。図 22 に示すように、閾値下のスイング値 (sub-threshold swing) S の改善とともに照射した PDD ピクセル暗電流は減少する。図より、S は界面トラップ電荷により劣化するが  $300^\circ\text{C}$  までのアニーリングでいずれも未照射の値まで回復する。一方、 $100 \text{ kGy}$  以下のガンマ線照射量では S の改善とともに照射による暗電流も消滅するが、

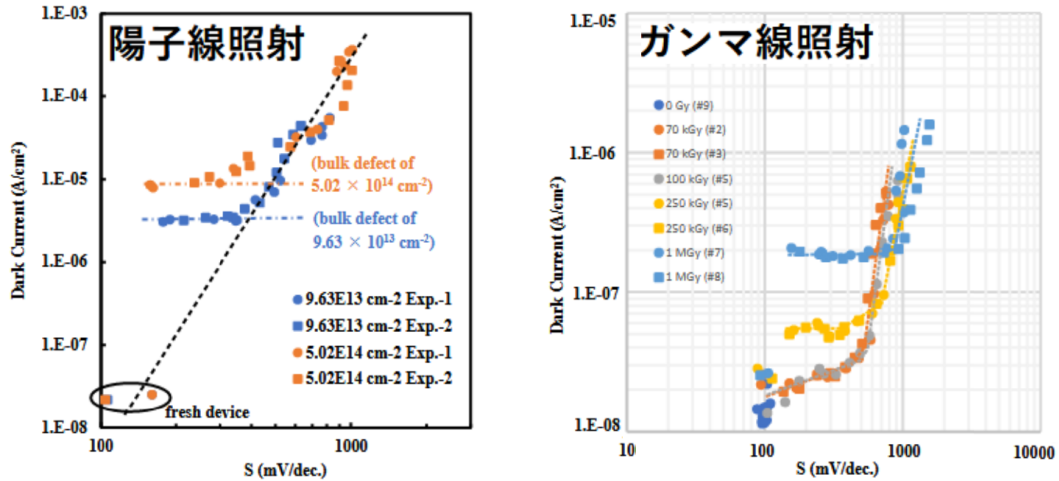


図 22: PDD 構造をもつピクセルの暗電流と BOX を用いた FET の S 値の関係。等時間アニーリング処理により照射直後（暗電流および S が最大）から徐々に未照射の S 値に漸近する。（左）陽子照射（1 および  $5 \times 10^{14} n/cm^2$  照射量）では S が回復しても暗電流が残り（右） $\gamma$  線照射では 100 kGy を越えると同様に暗電流が残るが、以下では回復することが定量的に評価できた。

これを超えるガンマ線照射および陽子線照射では界面トラップ以外の影響が残り、特に陽子線照射ではバルク損傷の影響が顕著である。

## (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長として高位置分解能と低物質量化が可能であることが挙げられる。KEK は AR-PF 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。INTPIX4NA は  $17\mu m$  のピクセルサイズをもつ厚さ  $300\mu m$  の積分型 SOI センサーである。これを 32 mm 間隔に 5 台配置したトラッカーを製作し、東北大学の ELPH の 200~820 MeV/c の陽電子ビームを用いてトラッカー性能を評価した。図 23 はビームラインに設置した様子である。

優れた位置分解能はピクセルサイズの微小さ、良い信号ノイズ比 (SN 比) および収集電荷が複数のピクセルに広がることで達成できる。図 24 左はヒット位置を再構成する際に用いるピクセルクラスター内に含まれるピクセル数 (クラスターサイズ) をセンサーバイアス電圧の関数として示した。全空乏化 (約 30 V) 未満では、空乏化厚が増加するに従いクラスターサイズは増加し、越えると電場が強くなるために最近接ピクセルへの電荷収集率が上がりクラスターサイズは減少に転じる。SN が 20 V のバイアスで 190~240 と極めて高いために位置分解能は 5 V~100 V の範囲で顕著な依存性を示さなかった。ただし 2 V では電荷収集量が小さくなるために劣化した。

5 枚のセンサーの 1 枚を位置測定用の検出器 (DUT)、他を飛跡再構成トラッカーとして幾つかの組合せでトラッカーと DUT ヒット位置の残差を測定したところ、DUT を挟む 2 枚-1 枚の組合せによる飛跡が最小の残差を示した。この方式による残差をビーム運動量の逆数の関数にして図 24 右に示す。図には ELPH での測定値に加えて以前に 120 GeV 陽子

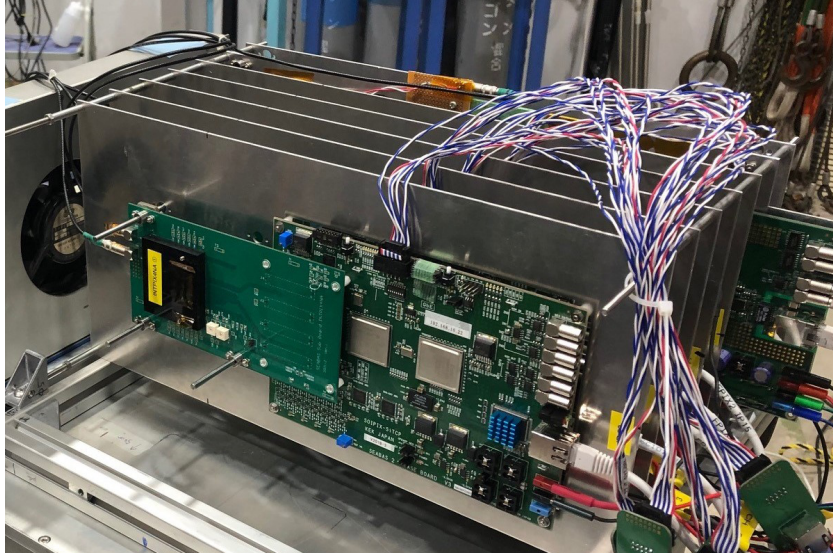


図 23: 東北大 ELPH ビームラインに設置した SOI トラッカー。センサー (面積  $9 \times 14 \text{ mm}^2$ ) を搭載したボードとデータ収集ボードをアルミ板 ( $20 \times 40 \text{ cm}^2$ ) に固定し、トリガー用 SOI センサーを含めて 6 枚を等間隔で配置している。

ビームを用いた同様の値  $\sigma_0 = 1.84 \pm 0.18 \text{ }\mu\text{m}$  を加えて

$$\sigma_{\text{res}}(p) = \sqrt{\sigma_0^2 + (k/p)^2} \quad (1)$$

の関数にフィットしたところ、 $k = 9.023 \pm 0.077 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{GeV}/c$  を得た。ELPH では多重散乱による影響が位置分解能に支配的である。KEK AR-TB のエネルギー領域に渡って GEANT4 に基づくシミュレーション計算結果も図に示した。5 GeV 電子に対して、シミュレーションは  $2.21 \pm 0.02 \text{ }\mu\text{m}$  を与え、式 (1) からは  $2.68 \pm 0.14 \text{ }\mu\text{m}$  が予想される。

DUT を挟む 2 枚-1 枚の組合せによる再構成は、DUT の厚さが  $300 \text{ }\mu\text{m}$  の場合に最適であったが、DUT が厚い場合でも 1 枚-2 枚による再構成位置との平均をとることで性能が余り劣化しないことが判明した。2 mm 厚のアルミ挿入の前後で、820 MeV/c 電子に対する残差  $11.04 \pm 0.10 \text{ }\mu\text{m}$  は  $11.60 \pm 0.19 \text{ }\mu\text{m}$  と抑えられた。

## 【7】 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。

2021 年には 2 号炉の観測結果 (溶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) および 3 号炉の観測結果 (溶け落ちて燃料装荷位置にはほとんど残っていない) が PTEP から出版された。



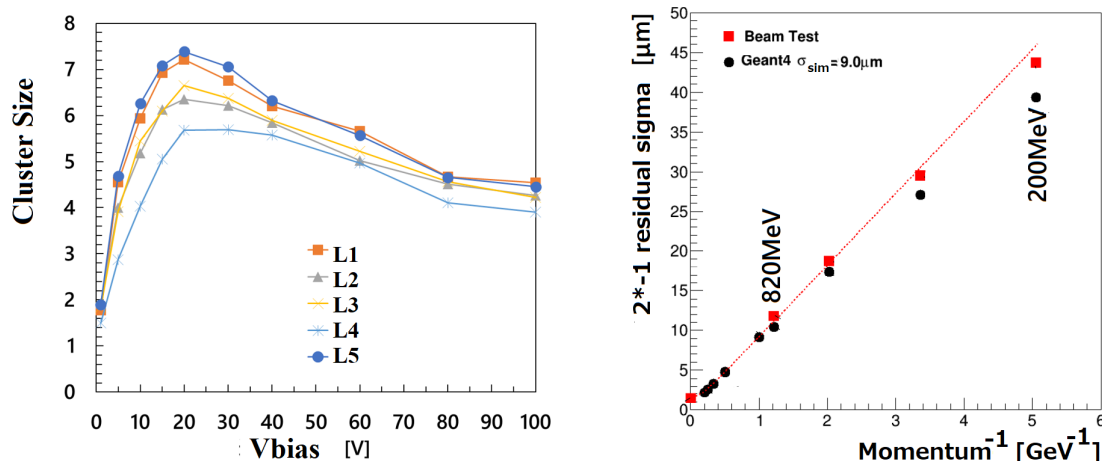


図 24: (左) クラスターサイズのバイアス電圧依存性。5 台のセンサーに対する結果。(右) DUT を挟む 2 枚-1 枚トラックで再構成した飛跡と DUT でのヒット位置の残差分布の標準偏差。運動量依存性を分解能を電子のエネルギーの関数として評価した。(右) 現有のシステムで計測したデータ収集レート

## [8] ガドリニウム含有シンチレータを用いた二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の観測は、ニュートリノのマヨラナ性や、物質の起源解明に関わる重要な研究である。もし発見されれば現在の宇宙が反物質でなく、物質で形成されている事実を理論的に説明することが出来る。また、 $0\nu\beta\beta$  崩壊率はニュートリノ有効質量二乗に比例するため、その半減期を測定すれば、素粒子標準理論の粒子で唯一未決定のニュートリノ質量も測定可能である。ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ( $2\nu\beta\beta$ ) が究極の BG となるが、それを防ぐためにはエネルギー分解能を高める必要がある。また、極稀な  $0\nu\beta\beta$  を測定するためには、大量の標的核を必要とする。半導体を用いた実験なども存在するが、シンチレータを用いたシンプルな実験は大型化の際に有利である。二重ベータ崩壊は  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{160}\text{Gd}$  等、十数種類の特定の原子核のみで観測可能である。我々は、 $\text{Ce}:\text{Gd}_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}$  (以下、GAGG) という無機シンチレータを用いて、 $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索実験 (PIKACHU 実験) を計画している。 $^{160}\text{Gd}$  の二重ベータ崩壊探索では、2001 年にウクライナで GSO シンチレータを用いて行われた実験がこれまでの最高感度である。二重ベータ崩壊実験では大量の標的核を用いることが重要であるが、この実験で用いられた GSO に含まれる  $^{160}\text{Gd}$  の量は 100g と少ないことで感度が制限されている。さらに内部の放射性不純物によるアルファ線がバックグラウンドとして多く存在し、それによって感度が制限されている。我々はこの二点を解決して、最高感度での  $^{160}\text{Gd}$  二重ベータ崩壊探索を目指している。

### (1) 各種 GAGG 結晶のシンチレータ性能比較

本研究ではまず、東北大学金属材料研究所の Cz 炉を活用し、組成がわずかに異なる下記 3 種類の GAGG 結晶について 5mm 角のものを作製した。実際の結晶写真を図 25 に示す。

- GAGG : 通常の組成
- HR-GAGG : Ga/Al 比を変えて、エネルギー分解能を高めたもの
- GFAG : Mg を共添加し、時定数を短くしたもの

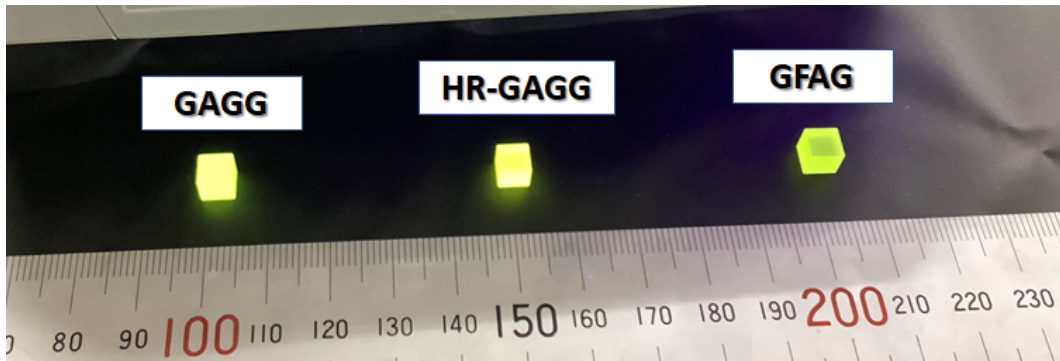


図 25: 左から実験で用いた GAGG, HR-GAGG, GFAG の各結晶。上方からブラックライトを照射している。

この三種の結晶に対して、浜松ホトニクス製の R669 というマルチアルカリ光電面を持つ PMT と組み合わせて性能評価を行った。 $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV  $\gamma$  線を用いたエネルギー分解能測定および  $^{137}\text{Cs}$  /  $^{241}\text{Am}$  の  $\gamma$  線 /  $\alpha$  線を用いた波形粒子識別能を調査した。

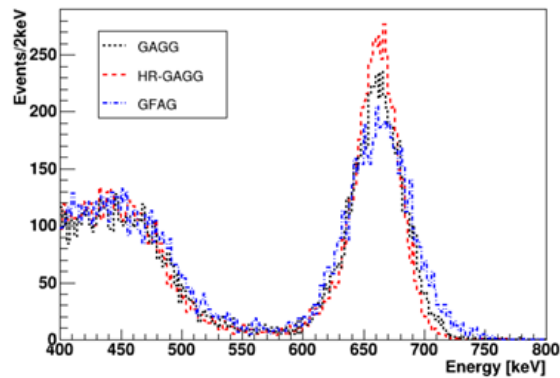


図 26: 三種の結晶に Cs 線源を照射した時の、光電ピーク付近のエネルギースペクトル。

三種の結晶に対し  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV  $\gamma$  線を照射した際のエネルギースペクトルを図 26 に示す。光電ピークをガウス分布 + 指数関数でフィットしてエネルギー分解能を見積もった。その結果、赤線で示す HR-GAGG が  $\sigma=2.5\%$  と最も良い分解能を示し、その次に GAGG ( $\sigma=3.0\%$ )、GFAG ( $\sigma=3.4\%$ ) という順番になった。 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{241}\text{Am}$  線源を照射した際の事象に対して作成した平均波形を図 27 に示す。結晶の種類によって粒子ごとの波形が大きく異なっていることが分かる。波形前半と全体の面積比の情報を用いて粒子識別能を定量的に評価したところ、結晶毎の波形識別能は GAGG、GFAG、HR-GAGG の順で優れていた。

## (2) 大型 GFAG 結晶を用いた放射性不純物量の評価

6.5 cm  $\phi$  × 14.5 cmL の大きな GFAG 結晶 (図 28 左) の育成を行い、その性能を評価した。そのため側面に反射材を巻く、アクリルのライトガイドを用いる、などして集光効率を高めた検出器を作製した。内部の放射性不純物によるバックグラウンドを測定するため、この検出器を岐阜県神岡にある地下 1000m の実験室において宇宙線の影響の少ない低バックグ



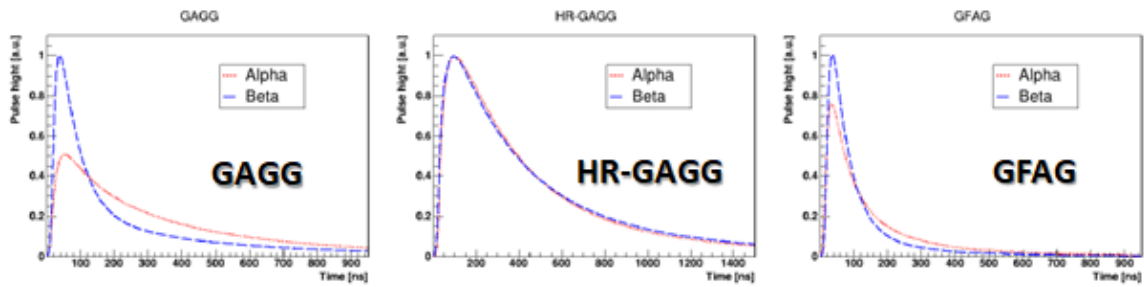


図 27: 三種の結晶毎の平均波形。アルファ線照射時が赤、ガンマ線照射時が青で描かれている。

ラウンド環境下で測定を行った。東北大学カムランド実験エリアにある放射線シールド（厚さ：鉛 15cm, 銅 5cm）内に検出器を設置し、約 12 時間のデータ取得を行った（図 28 右）。

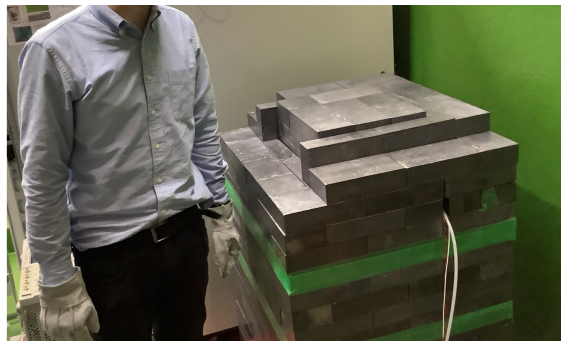


図 28: (左) 金研で作製した大型 GFAG 結晶に反射材のテフロンテープを巻いているところ。(右) 神岡地下実験室の鉛シールドで 7 月に行った実験の様子。

まず大型の結晶において、エネルギー分解能は  $\sigma=5.7\% @ 662 \text{ keV}$  を実現し、これは先行研究の小さいサイズの GSO 結晶を用いた実験と比較して良い分解能であった。また、地上から地下へ検出器を移しシールド内に設置することにより、バックグラウンドを低減できることを確認した。図 29 左は、つくば（地上）および神岡（地下）で行ったバックグラウンド測定のエネルギースペクトルである。赤の地上実験に比べ、青い地下実験でのスペクトルには環境  $\gamma$  線のピーク ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  etc.) が消えて、全体的にバックグラウンドレートが下がっていることが分かる。特に  $^{208}\text{Tl}$  由来の  $\gamma$  線 (2615 keV) に関しては、地上のレートと比べ、実に 1/30 に低減することが出来た。また、地下で取得したデータに対し、ウラン/トリウム系列の放射性不純物量を詳細に調査した。 $^{238}\text{U}$  および  $^{232}\text{Th}$  の崩壊系列には、どちらも Bi-Po の  $\beta$ - $\alpha$  連続崩壊が存在し、その半減期はそれぞれ  $164 \mu\text{s}$ ,  $0.3 \mu\text{s}$  である。典型的な Th 系列の連続崩壊事象の例を図 29 右に示す。この連続崩壊事象の発生頻度を測定することにより、それぞれの不純物レベルを測定したところ、以下の結果が得られた。

- ウラン系列 : 約 0.4 mBq/kg
- トリウム系列 : 約 40 mBq/kg

よって本研究で用いた GFAG 結晶は Th 系列の放射性不純物によって汚染されており、二重ベータ崩壊実験に用いるためには、これを約二桁低減する必要があることが判明した。今

後、高純度な材料を入手し、それを用いた結晶育成を行っていく予定である。

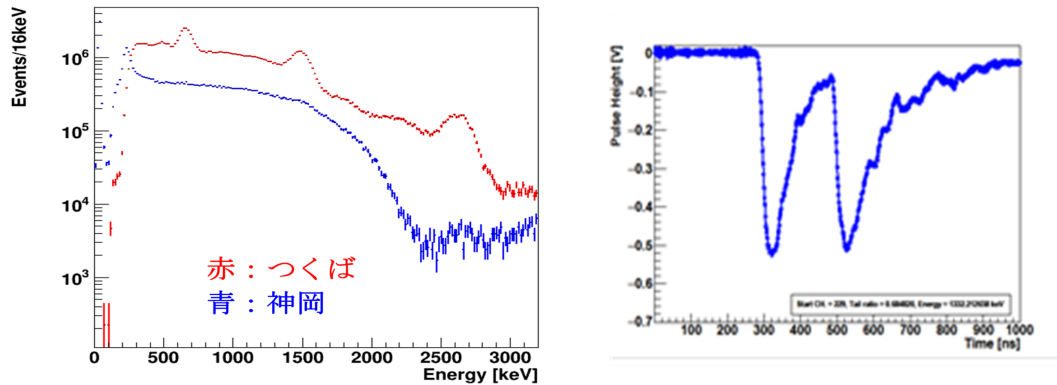


図 29: (左) 大型結晶を用いた実験で得られたバックグラウンドデータ。赤は地上、青は地下で行った実験である。(右) Th 系列の Bi-Po 連続崩壊事象と思われる波形の例。

#### 〈 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 260 千円 (直接経費 200 千円、間接経費 60 千円) (2021 年度、繰越)
2. 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 6,240 千円 (直接経費: 4,800 千円、間接経費: 1,440 千円)(2021 年度)
3. 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, 5,200 千円 (直接経費 4,000 千円、間接経費 1,200 千円) (2021 年度)
4. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「異分野連携で挑む革新的水シンチレータ技術の実現」、 2021 - 2022 年度、研究代表者：飯田崇史, 1,170 千円 (直接経費: 900 千円、間接経費: 270 千円) (2021 年度)
5. 公益財団法人島津科学技術振興財団/研究開発助成 (領域全般) 「無機シンチレータでの発光波長と応答波形を用いた粒子識別技術の開拓」、 2021 - 2022 年度、研究代表者：飯田崇史, 1,000 千円 (直接経費: 1,000 千円、間接経費: 0 千円) (2021 年度)
6. 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, 1,430 千円 (直接経費: 1,100 千円、間接経費: 330 千円) (2021 年度)

#### 〈 受賞 〉

1. 原和彦, 令和3年度文部科学大臣表彰, 科学技術賞 (科学技術振興部門), 「素粒子実験半導体センサーの発展とその社会貢献」
2. 北彩友海, 日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子実験領域), 2021年秋季大会

〈 国際会議の実施 〉

1. TGSW2021, Universe Evolution and Matter Origin, September 11, 2021, online.

〈 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], “Measurement of the charge asymmetry of electrons from the decays of  $W$  bosons produced in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **104**, 092002 (2021)
2. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the jet mass in high transverse momentum  $Z(\rightarrow b\bar{b})\gamma$  production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **812**, 135991 (2021)
3. M. Aaboud, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the relative  $B_c^\pm/B^\pm$  production cross section with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *Phys. Rev. D* **104**, 012010 (2021)
4. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Longitudinal Flow Decorrelations in Xe+Xe Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 122301 (2021)
5. 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); erratum: *JHEP* **05**, 207 (2021)]
6. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $CP$ -violating phase  $\phi_s$  in  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  decays in ATLAS at 13 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 342 (2021)
7. 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  $4\ell$  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)]

8. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair single- and double-differential cross-sections in the all-hadronic channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” JHEP **01**, 033 (2021)
9. 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)]
10. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Differential cross-section measurements for the electroweak production of dijets in association with a  $Z$  boson in proton–proton collisions at ATLAS,” Eur. Phys. J. C **81**, 163 (2021)
11. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of single top-quark production in association with a  $W$  boson in the single-lepton channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, 720 (2021)
12. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet energy scale and resolution measured in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, 689 (2021)
13. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $WH$  and  $ZH$  production in the  $H \rightarrow b\bar{b}$  decay channel in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **81**, 178 (2021)
14. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **812**, 135980 (2021)
15. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of hadronic event shapes in high- $p_T$  multijet final states at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **01**, 188 (2021)
16. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of the universality of  $\tau$  and  $\mu$  lepton couplings in  $W$ -boson decays with the ATLAS detector,” Nature Phys. **17**, 813-818 (2021)
17. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the associated production of a Higgs boson decaying into  $b$ -quarks with a vector boson at high transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **816**, 136204 (2021)
18. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of light-by-light scattering and search for axion-like particles with  $2.2 \text{ nb}^{-1}$  of Pb+Pb data with the ATLAS detector,” JHEP **11**, 050 (2021)

19. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for type-III seesaw heavy leptons in dilepton final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 218 (2021)
20. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Medium-Induced Modification of  $Z$ -Tagged Charged Particle Yields in Pb+Pb Collisions at 5.02 TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 072301 (2021)
21. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Optimisation of large-radius jet reconstruction for the ATLAS detector in 13 TeV proton–proton collisions,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 334 (2021)
22. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a pair of  $Z$  bosons in the  $\ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$  and  $\ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$  final states using  $139\text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 332 (2021)
23. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for phenomena beyond the Standard Model in events with large  $b$ -jet multiplicity using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 11 (2021) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 249 (2021)]
24. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of scalar leptoquarks decaying into first- or second-generation leptons and top quarks in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 313 (2021)
25. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged-lepton-flavour violation in  $Z$ -boson decays with the ATLAS detector,” *Nature Phys.* **17**, 819-825 (2021)
26. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of photon-induced  $W^+W^-$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **816**, 136190 (2021)
27. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Dark Higgs Boson Decaying into  $W^\pm W^\mp$  or  $ZZ$  in Fully Hadronic Final States from  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  Collisions Recorded with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 121802 (2021)
28. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson production in association with a high-energy photon via vector-boson fusion with decay into bottom quark pairs at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **03**, 268 (2021)

29. 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 jets and missing transverse momentum using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  collision data with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 143 (2021)
30. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with an energetic photon in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *JHEP* **02**, 226 (2021)
31. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a heavy Higgs boson decaying into a Z boson and another heavy Higgs boson in the  $\ell\ell b\bar{b}$  and  $\ell\ell W W$  final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 396 (2021)
32. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs bosons decaying to bottom quarks from vector boson fusion production with the ATLAS experiment at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 537 (2021)
33. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Displaced Leptons in  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 051802 (2021)
34. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a single top quark in  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 860 (2021)
35. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for trilepton resonances from chargino and neutralino pair production in  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **103**, 112003 (2021)
36. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Exclusive dimuon production in ultraperipheral Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$  with ATLAS,” *Phys. Rev. C* **104**, 024906 (2021)
37. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction and identification efficiency in ATLAS using the full Run 2  $pp$  collision data set at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 578 (2021)
38. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with top quark pairs in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 174 (2021)
39. 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 one isolated lepton,



- jets, and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 600 (2021) [erratum: *Eur. Phys. J. C* **81**, 956 (2021)]
40. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The ATLAS Fast TrackKer system,” *JINST* **16**, P07006 (2021)
  41. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the parton distribution functions of the proton from ATLAS measurements of differential  $W^\pm$  and  $Z$  boson production in association with jets,” *JHEP* **07**, 223 (2021)
  42. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Two-particle azimuthal correlations in photonuclear ultraperipheral Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. C* **104**, 014903 (2021)
  43. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of third-generation scalar leptoquarks decaying into a top quark and a  $\tau$ -lepton in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 179 (2021)
  44. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly and singly charged Higgs bosons decaying into vector bosons in multi-lepton final states with the ATLAS detector using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *JHEP* **06**, 146 (2021)
  45. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with  $b$ -jets and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **05**, 093 (2021)
  46. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with two opposite-charge leptons, jets and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **04**, 165 (2021)
  47. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying into a top quark and a bottom quark at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 145 (2021)
  48. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with an energetic jet and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **103**, 112006 (2021)
  49. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS RPC detector and Level-1 muon barrel trigger at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *JINST* **16**, P07029 (2021)

50. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances decaying into photon pairs in 139 fb<sup>-1</sup> of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **822**, 136651 (2021)
51. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross-sections in four-lepton events in 13 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 005 (2021)
52. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom-squark pair production in  $pp$  collision events at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with hadronically decaying  $\tau$ -leptons,  $b$ -jets and missing transverse momentum using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **104**, 032014 (2021)
53. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for Higgs boson decays to a low-mass dilepton system and a photon in  $pp$  collisions at  $s=13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **819**, 136412 (2021)
54. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $W^+W^- + \geq 1$  jet production cross-sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **06**, 003 (2021)
55. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with four or more charged leptons in 139 fb<sup>-1</sup> of  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 167 (2021)
56. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the inclusive and differential production cross sections of a top-quark–antiquark pair in association with a Z boson at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 737 (2021)
57. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for the decays of stopped long-lived particles at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **07**, 173 (2021)
58. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying into two photons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **10**, 013 (2021)
59. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for New Phenomena in Final States with Two Leptons and One or No  $b$ -Tagged Jets at  $\sqrt{s} = 13$  TeV Using the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **127**, 141801 (2021)
60. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino–neutralino pair production in final states with three

leptons and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 1118 (2021)

61. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Configuration and performance of the ATLAS b-jet triggers in Run 2,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 1087 (2021)
62. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for R-parity-violating supersymmetry in a final state containing leptons and many jets with the ATLAS experiment using  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  proton–proton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **81**, 1023 (2021)
63. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of sensor radiation damage in the ATLAS inner detector using leakage currents,” *JINST* **16**, P08025 (2021)
64. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}\bar{t}$  production cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 118 (2021)
65. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exotic decays of the Higgs boson into long-lived particles in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using displaced vertices in the ATLAS inner detector,” *JHEP* **11**, 229 (2021)
66. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section of pairs of isolated photons in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 169 (2021)
67. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charginos and neutralinos in final states with two boosted hadronically decaying bosons and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **104**, 112010 (2021)
68. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in  $pp$  collisions in final states with tau leptons, b-jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **104**, 112005 (2021)
69. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $b$ -quark fragmentation properties in jets using the decay  $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **12**, 131 (2021)
70. G. Aad, K. Hara, S. Hirose, Y. Ikegami, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Standard Model Higgs boson decaying into b-quarks using the full Run 2 dataset from the ATLAS detector,” *JHEP* **11**, 209 (2021)

71. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021**, 023C01 (2021).
72. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Study of the Unit-3 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 013C02 (2022).
73. I. Kurachi, K. Hara *et al.*, “Intelligent Three-Dimensional Chip-Stacking Process for Pixel Detectors for High Energy Physics Experiments”, *JPS Conference Proceedings* **34**, 010010 (2021).
74. K. Nakamura, S. Kita, T. Ueda, K. Hara, H. Suzuki, “First Prototype of Finely Segmented HPK AC-LGAD Detectors”, *JPS Conference Proceedings* **34**, 010016 (2021).
75. K. Fushimi, T. Iida, *et al.*, “Development of highly radiopure NaI(Tl) scintillator for PICOLON dark matter search project ” ,  
*Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021**, 043F01 (2021)
76. M.R. Anderson, T. Iida, *et al.*, “Development, characterisation, and deployment of the SNO+ liquid scintillator ” ,  
*Journal of Instrumentation* **16**, P05009 (2021)
77. S. Ajimura, T. Iida, *et al.*, “Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrinoless double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$  ” ,  
*Physical Review D* **103**, 092008 (2021)
78. V. Albanese, T. Iida, *et al.*, “The SNO+ experiment ” ,  
*Journal of Instrumentation* **16**, P08059 (2021)
79. K. Fushimi, T. Iida *et al.*, “PICOLON dark matter search project ” ,  
*J. Phys.: Conf. Ser.* 2156, 012045 (2021)
80. Y. Minami, T. Iida *et al.*, “Status of  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay search in CANDLES”,  
*J. Phys.: Conf. Ser.* 2156, 012145 (2021)

(査読なし論文, 解説記事等)

1. 池上陽一, 伊藤正俊, 中村浩二, 原 和彦, 外川学, 「CYRIC 陽子ビームを用いた ATLAS シリコン検出器の放射線耐性評価」, 日本加速器学会誌『加速器』 **18**, 169-176 (2021).
2. 飯田崇史, 「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\text{DBD}$ ) 探索によるマヨラナ性検証とニュートリノ質量測定実験」  
原子核研究特集号 (第 66 巻 2 号) 「日本の核物理の将来レポート (2021 年版)」, 原子核談話会, pp.297-303, 2021 年 12 月
3. 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 浅野千紗, 笠島誠嘉, 前川群, 中原瑳衣子, 山根綾太, 吉田拓生, 他 26 名 (COBAND collaboration), “宇宙背景ニュートリノ崩壊探

素 COBAND 実験”, 観測ロケットシンポジウム 2020 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2020 SA6000162000, III-4 (2021)

4. Y. Takeuchi, S.H. Kim, T. Iida, C. Asano, R. Wakasa, G. Maekawa, S. Nakahara, R. Yamane, T. Yoshida *et al.* (COBAND collaboration), “Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project” (Extended abstract), The 2021 International Symposium on VLSI Technology Systems and Applications (VLSI-TSA) Proceedings of Technical Papers, 115-116 (2021), DOI: 10.1109/VLSI-TSA51926.2021.9440090

〈学会・研究会発表〉

(国内)

1. 飯田崇史：COBAND プロジェクトにおける遠赤外光学系の開発，  
宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日), オンライン開催
2. 廣瀬茂輝：ATLAS 実験からの最近の結果と Run 3 実験に向けた準備状況，  
宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日), オンライン開催
3. 原 和彦：宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子炉の透視」を振り返って，  
宇宙史研究センター 2021 年度第 1 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 6 月 25 日), オンライン開催
4. 和田冨：LHC-ATLAS 実験における荷電レプトンフレーバーを破るウィークボソン散乱過程の多変量解析を用いた探索感度評価，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
5. 山内大輝：LHC-ATLAS 実験における高運動量トップクォーク再構成手法を用いた荷電ヒッグス粒子探索感度の評価結果，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
6. 熊倉泰成：HL-LHC ATLAS 内部飛跡検出器アップグレードに向けたシリコンピクセル検出器のノイズ評価，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
7. 齊藤功太：HL-LHC ATLAS で用いるピクセル検出器の量産に向けたバンプ接合の熱耐性評価，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
8. 廣瀬茂輝：LHC ATLAS 実験 Run 1 および Run 2 運転を通じたシリコンストリップ検出器の性能評価と Run 3 運転への展望，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催
9. 石井達也：高輝度 LHC ATLAS 実験シリコンストリップセンサーの実機量産中における性能評価，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日), オンライン開催

10. 和田冨：ATLAS 実験シリコンストリップ検出器の TCAD シミュレーションによる放射線損傷の評価，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン開催
11. 植田樹：新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性に関する研究，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン開催
12. 北彩友海：テストビームを用いた新型 LGAD 飛跡検出器 (AC-LGAD) の開発研究，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン開催
13. 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 用テレスコープシステム構築，  
日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021 年 9 月 14-17 日)，オンライン開催
14. 佐藤構二：ATLAS 実験の最近の物理成果，  
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 11 月 26 日)，オンライン開催
15. 武内勇司：COBAND 実験のための STJ 遠赤外単一光子検出器開発現状，  
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回構成員会議・成果報告&交流会 (2021 年 11 月 26 日)，オンライン開催
16. Takashi Iida，「無機シンチレータの発光波長情報を用いた粒子識別技術の開発」，  
KEK 測定器開発室 Platform A 第 2 回研究会 オンライン 2021 年 12 月 27 日
17. 鈴木尚紀，原和彦：SOI ピクセル検出器高精度テレスコープシステム ELPH 820MeV/c 陽電子ビームテストによる性能評価，  
AR テストビームライン研究会，2022 年 1 月 13 日，KEK.
18. 守屋佑希久：ニュートリノ崩壊探索のための超伝導素子読み出し用極低温増幅器の開発，  
SAT テクノロジー・ショーケース 2022(2021 年 1 月 27 日)，オンライン開催
19. 柏木隆城：ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外光集光器の開発，  
SAT テクノロジー・ショーケース 2022(2021 年 1 月 27 日)，オンライン開催
20. 大森匠，原和彦：SOI ピクセル検出器テレスコープシステムを用いた GeV 電子ビームのトラッキング，  
ELPH シンポジウム 2022，2022 年 3 月 11 日，東北大学電子光理学研究センター，オンラインポスター発表.
21. 山内大輝：LHC-ATLAS 実験における高運動量トップクォーク再構成手法を用いた荷電ヒッグス粒子探索での  $t\bar{t}$  背景事象の見積手法開発，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日)，オンライン開催
22. 鈴木尚紀：陽子線・ガンマ線照射による PDD 構造 SOI ピクセルセンサの放射線耐性評価，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15-19 日)，オンライン開催

23. 大森匠：KEK テストビームライン AR-TB 用テレスコープシステムに用いる SOI ピクセル検出器の性能評価，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
24. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けた形状測定の精度検証と測定の効率化，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
25. 比江森友太：HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの 70 MeV 陽子線照射環境下での放射線耐性評価，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
26. 植田樹：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の不純物濃度依存性の研究，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
27. 北彩友海：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の性能評価とその改良に向けた研究，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
28. 五屋郁美：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の光検出器への応用に関する研究，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
29. 齊藤 功太：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けたモジュールのノイズ及びバンプ接合の熱耐性評価，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
30. 鈴木尚紀：陽子線・ガンマ線照射による PDD 構造 SOI ピクセルセンサの放射線耐性評価，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
31. 村田仁慈：高輝度 LHC ATLAS 実験での ITk Pixel 検出器の量産にむけた品質検査のための読み出し拡張ボードの開発報告，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
32. 飯田崇史：PIKACHU 実験による Gd-160 の二重ベータ崩壊探索，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
33. 飯坂俊介：高輝度 LHC ATLAS 実験用ピクセルセンサー量産に向けた品質保証システムの構築，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
34. 山根綾太：COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
35. 守屋佑希久：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 XIII，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催
36. 柏木隆城：ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外光集光器の開発およびシミュレーション，  
日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年 3 月 15–19 日)，オンライン開催



37. S. Kita : Recent development of finely segmented AC-LGAD sensors,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 22 日), オンライン  
開催
38. H. Suzuki : Precision beam tracker for the KEK AR TB based on SOI sensor tech-  
nology,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 22 日), オンライン  
開催
39. S. Hirose : Production of microstrip silicon sensors for the HL-LHC ATLAS ITk,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 22 日), オンライン  
開催
40. 柳瀬健太郎 : HL-LHC に向けた放射線照射済み ITk ピクセルモジュール評価のための  
クーリングシステム開発,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
41. 比江森友太 : HL-LHC ATLAS 実験用ピクセルモジュールの 70 MeV 陽子線照射環境  
下での放射線耐性評価,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
42. 飯坂俊介 : H 高輝度 LHC ATLAS 実験用ピクセルセンサー量産に向けた品質保証シス  
テムの構築,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
43. 齊藤功太 : HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けたモジュールのバンプ  
接合の熱耐性評価,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
44. 原 和彦 : ヒッグス粒子ー ATLAS 実験とこれからー,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
45. 武内勇司 : 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索イントロダクション,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
46. 守屋佑希久 : COBAND 実験のための極低温増幅器の研究開発,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催
47. 柏木隆城 : ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外集光器の開発,  
筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日), オンライン  
開催

48. 山根綾太：COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定，筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日)，オンライン開催
49. 大森 匠：SOI ピクセル検出器を用いた KEK PF-AR テストビームライン用テレスコープシステムの性能評価，筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日)，オンライン開催
50. 五屋郁美：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の光検出器への応用に関する研究，筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日)，オンライン開催
51. 植田 樹：新型 LGAD 検出器 (AC-LGAD) の放射線耐性の研究，筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日)，オンライン開催
52. 倉持花梨：HL-LHC ATLAS 用ピクセルモジュール量産に向けた形状測定の精度検証と測定の効率化，筑波大学宇宙研究センター 2021 年度ワークショップ (2022 年 3 月 23 日)，オンライン開催
53. 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

(国際会議・研究会)

1. Shigeki Hirose (ATLAS Collaboration), “Measurements and searches of Higgs boson production involving fermion couplings with the ATLAS detector”, XXVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2021), online, April 12-16, 2021.
2. Y. Takeuchi *et al.*, (Invited talk) “Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project”, The 2021 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA), April 19-22, 2021, the Ambassador Hotel Hsinchu, Taiwan (video presentation)
3. Sayuka Kita, K. Hara *et al.*, “A study of AC-LGAD structure for finer pitch readout electrodes” (poster presentation), US-Japan Hawaii Symposium of the Science and Technology Cooperation Program, online, April 21-23, 2021.
4. Takashi Iida, “CANDLES : Low background double beta decay experiment using Ca-48” (poster presentation), The 28th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2021), online, June 9, 2021.

5. Sayuka Kita, K. Hara *et al.*, “Development of finely segmented AC-LGAD sensors by HPK for precise timing trackers”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, online, Oct. 16 - 23, 2021.
6. Hisanori Suzuki, K. Hara *et al.*, “Contribution of interfacestate and bulk damages to the dark current increase in SOI pixel sensor with pinned depleted diode structure”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, online, Oct. 16 - 23, 2021.

〈 学位論文 〉

( 修士論文 )

大学院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム, 2021年2月

1. 植田 樹 : 次世代高輝度加速器実験のための高時間分解能を持つ新型半導体検出器 AC-LGAD の放射線耐性の研究
2. 齊藤功太 : HL-LHC ATLAS 実験に向けたストリップセンサー品質保証システムの構築及びクアッド型ピクセルモジュールの性能評価
3. 鈴木尚紀 : 大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX を用いた KEK テストビームライン用高精度トラッキングシステムの構築
4. 村田仁慈 : 高輝度 LHC ATLAS 内部飛跡検出器用ピクセル検出器の量産に向けた多数モジュール同時読出しシステムの開発
5. 山根 綾太 : COBAND 実験における反射防止膜設計のための Nb と Hf の光学定数測定