

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, 大川 英希
研究員	武政 健一
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
研究生	1名
学群4年次生	4名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子衝突型加速器を用いた国際共同実験 CDF および ATLAS に参加し、エネルギー・フロンティアでの素粒子実験研究を遂行している。CDF は 2011 年度に運転終了、ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始した。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。また、宇宙背景ニュートリノ探索実験 COBAND とそのための高分解能光検出器 STJ の開発、SOI 技術を用いた次世代粒子検出器の開発を行っている。

当グループの教員は宇宙史研究センターに所属し、国内外機関との連携を深めて研究を強力に推進するための組織整備を行っている。平成 30 年度には、引き続き 3 名の研究者を本学教員として招き、より密接な共同研究の体制のもと、共同研究を行っている。

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれている。2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが、2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である。この全データを用いた物理解析もそのほとんどが終了し、論文の発表も終幕を迎えつつある。2018-19 年には 7 篇の原著論文が公表された。

2019 年春には、CDF 実験グループが D0 実験グループとともに、欧州物理学会の 2019 年高エネルギー素粒子物理学賞を受賞することが決定した。対象は「トップクォークの発見とその性質の詳細な測定」である。この賞は 1989 年に創設され、2 年毎に、高エネルギー物理学の実験、理論、もしくは技術領域における傑出した貢献を成した個人や共同研究グループに授与されるものである。受賞式は 7 月 15 日に EPS-HEPP Conference 2019, Ghent, Belgium において開催される。

【2】 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。2011-2012 年の Run-1 実験では、重心系エネルギー 7~8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年から 2018 年の Run-2 実験では、重心系エネルギー 13 TeV で衝突実験を続けてきた。2019 年-2020 年には、アップグレードのためのシャットダウンを行い、2021 年から Run-3 実験で、さらに多くの陽子・陽子衝突事象のデータを蓄積する予定である。

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

2018 年度にも、われわれは精力的に取得した衝突データを解析した。多くの物理解析では、2015~2016 年の 2 年間に取得した約 36 fb^{-1} 、または 2017 年までに取得していた 80 fb^{-1} のデータ¹ を用いて研究を行った。2019 年春には、2018 年末までの全 Run-2 データを用いた物理解析結果もいくつか公表した。

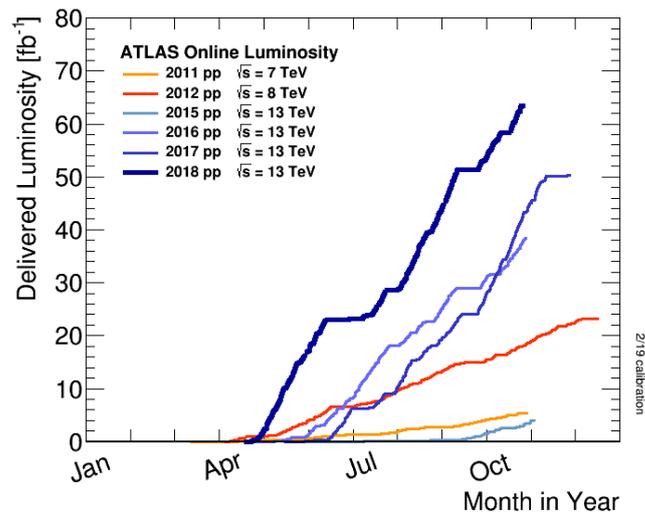


図 1: ATLAS 実験で取得したデータ量の推移を、年ごとに示している。

(1) 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 LHC 加速器での陽子・陽子衝突データを用いて発見された。Run-1 のデータの解析によりすでに、スピン・パリティの測定結果が標準理論の予言値 0^+ と整合がよいことが確認された。ヒッグス粒子が弱ゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$ 、 $H \rightarrow WW^*$ の崩壊モードおよび、トップクォークのループ・ダイアグラムが寄与する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、 5σ を超える有意度で観測された。とくに、

¹ 記録された全データ量は 2 年間で 39.6 fb^{-1} だが、検出器に不具合がある状況で取得したデータは物理解析には用いない。解析に使われるデータ量が取得した全データより少ないのはこのためである。

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ と $H \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。2018 年には、Run-1、Run-2 の全データを用いてこれら 2 崩壊チャンネルを解析した結果、ヒッグス粒子の質量は $124.97 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$ と測定された。この質量測定解析での、チャンネルごとおよび 2 チャンネルを足し合わせた測定結果、または Run-1 と Run-2 データを単独で解析した測定結果の比較を図 2 に示す。この ATLAS 実験単独での結果は、Run-1 データを用いた ATLAS と CMS 両実験を足し合わせて得られたこれまでの世界平均と同等の測定精度を達成している。

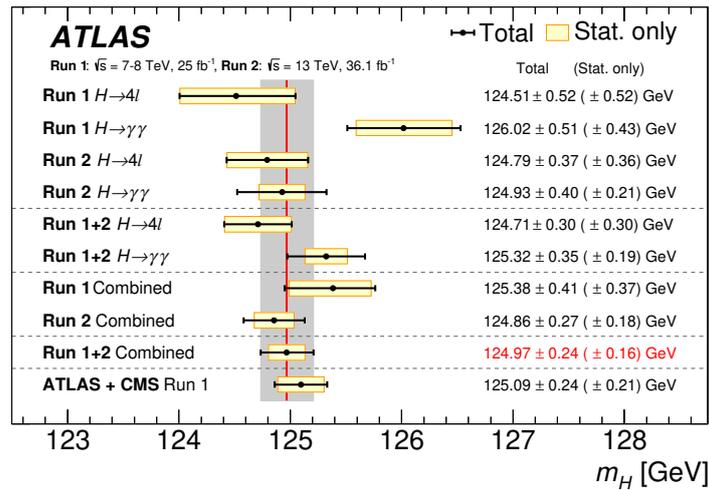


図 2: ATLAS 実験でのヒッグス粒子の質量測定結果。 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ と $H \rightarrow \gamma\gamma$ の 2 チャンネルを合わせて測定しているが、同時に各チャンネルの単独の結果はお互いによく一致している。

Run-1 のデータの詳細な解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ が ATLAS と CMS 両実験の複合結果で 5σ を超える有意度で観測されたことで、Run-2 が始まる前には、ヒッグス粒子のフェルミオン対への崩壊も観測されていた。しかし、ヒッグス粒子とクォークとの結合を直接観測することは Run-2 での課題として残っていた。

標準理論では $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊分岐比は 58% と予想されている。一方で、ボトムクォークに起因するジェットは陽子・陽子の QCD 反応で高い頻度で生成されるため、膨大なバックグラウンドに $H \rightarrow b\bar{b}$ 事象は埋もれてしまって観測が難しい。ヒッグス粒子が弱ボソン W および Z を伴って生成される WH および ZH 生成過程で、 W や Z ボソンがレプトンまたはニュートリノに崩壊する事象を探することでバックグラウンドは大幅に減らすことができる。ATLAS 実験ではこれら解析チャンネルで $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊の観測を目指してきたが、2017 年度には Run-2 データのうち 36.1 fb^{-1} の解析により 3.5σ の有意度で信号の兆候を観測していた。2018 年度には、Run-1 の全データと Run-2 の 79.8 fb^{-1} のデータを用いて $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊を 5.4σ の有意度で観測することに成功した。標準理論の予言値で規格化した WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果と、2 つのボトムクォークの不変質量を図 3 に示す。

トップクォークは、湯川結合によって質量を得るフェルミオンの中でもっとも重く、したがってヒッグス粒子との結合が強い。そして、フェルミオンの中で唯一、電弱対称性が敗れるエネルギー・スケールに質量がある。トップクォークとヒッグス粒子の結合を測定することは、とくに興味深い。これを直接測定できる解析チャンネルが、 $t\bar{t}H$ 生成過程である。

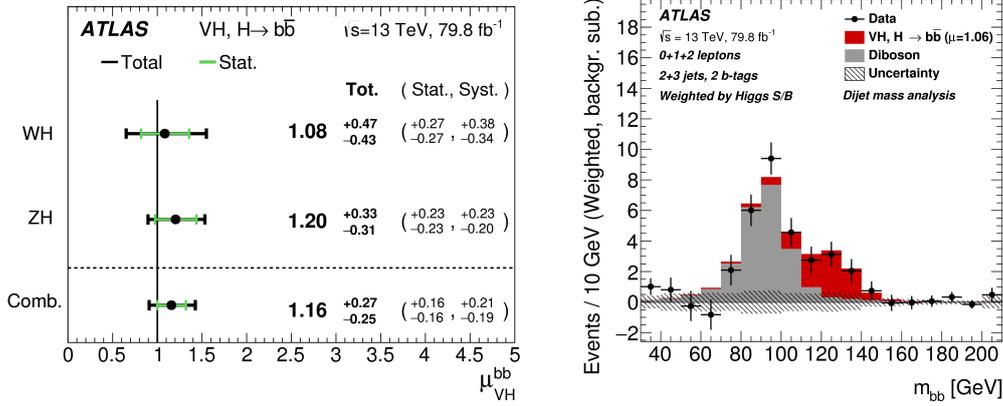


図 3: (左) WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果。測定値は、標準理論による理論値で規格化してある。測定結果は、標準理論の予言とよく一致している。(右) 事象内の2つのボトムクォークの不変質量の分布。電弱相互作用で生成される WZ と ZZ バックグラウンド事象以外のバックグラウンドの寄与を差し引いた後の分布であり、灰色の部分がバックグラウンド。ヒッグス粒子の信号のベストフィットを赤いヒストグラムで表している。

2017年度には、ヒッグス粒子 WW^* , ZZ^* , $\gamma\gamma$, $b\bar{b}$ に崩壊する解析チャンネルの解析結果を足し合わせることで、 36.1 fb^{-1} のデータを使って 4.3σ の有意度で信号の兆候を観測することができていた。2018年度には、 $\gamma\gamma$ および $ZZ^* \rightarrow 4l$ 崩壊モードの解析を 79.8 fb^{-1} の Run-2 データを用いてアップデートし、2017年の WW^* , $b\bar{b}$ 崩壊モードの解析結果と新たに足し合わせた結果、 6.3σ の有意度で $t\bar{t}H$ 生成過程を観測することができた。事象の信号らしさを全チャンネルで一つにまとめてプロットした図と、 $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した値を、図 4 に示す。

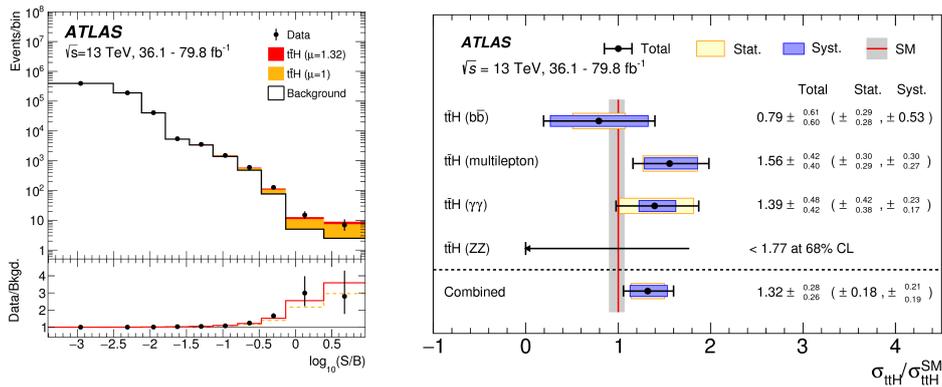


図 4: (左) $t\bar{t}H$ 事象探索の各解析チャンネルで評価した事象の信号らしさを、全チャンネルまとめてプロットしたもの。ここでの信号らしさは、各解析の最終段階のヒストグラムの S/B の値を使っている。(右) ヒッグス粒子の崩壊モードごとに測定した $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積と標準理論の予言値の比。

Run-1 での $H \rightarrow \tau\tau$ 、2018 年度の $H \rightarrow b\bar{b}$ と $t\bar{t}H$ 過程の観測により、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。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り、ATLAS 実験では、 $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の観測を目指している。図

5に、2018年度にアップデートした解析における2つの μ 粒子の不変質量分布を示すが、いまのところバックグラウンドとの一致がよく、信号は確認できていない。ヒッグス粒子の生成断面積と $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊分岐比の積に対して、標準理論の予言値の2.1倍より大きい値を95%の信頼度で棄却した。

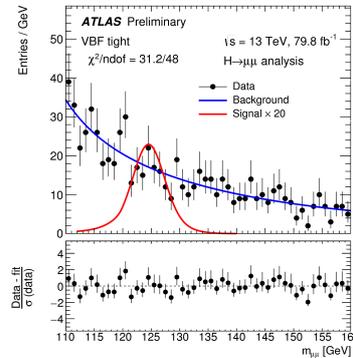


図 5: $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程の探索解析。バックグラウンドが少ないベクトル・ボソン融合による生成過程に感度が高い解析チャンネルでの、2つの μ 粒子の不変質量分布。

ヒッグス粒子はもっとも最近に発見された粒子であり、その性質を詳しく測定して標準理論を厳しく検証することは重要である。ATLAS実験では、ここまで述べてきた通り、さまざまなヒッグス粒子の生成、崩壊過程を個別に測定し、標準理論の予言と比べている。同時に、これら複数の解析チャンネルを総合的に解析することで、より精度よくヒッグス粒子と他の標準理論粒子の間の結合の強さを測定することができる。2019年3月には、 79.8 fb^{-1} のデータを用いて複合測定による結合測定をアップデートし、公表した。この解析では、 79.8 fb^{-1} のデータを用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ (ttH 生成過程を含む)、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ (ttH 生成過程を含む)、 $VH, H \rightarrow b\bar{b}$ 、 $H \rightarrow \mu\mu$ および、 36.1 fb^{-1} のデータを用いた $H \rightarrow WW^*$ 、 $H \rightarrow \tau\tau$ 、 ttH ($H \rightarrow b\bar{b}$ または $H \rightarrow$ 複数レプトンに崩壊する場合)、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊過程の探索、オフシェルでの $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell/2\ell 2\nu$ の各チャンネルの解析で得られた結果を同時にフィットすることで、ヒッグス粒子に関する重要な物理パラメータを得る。図6に、得られたフィットの結果を示す。左の図は、全解析の結果を同時フィットすることで、さまざまなヒッグス粒子の生成過程 i と崩壊過程 f の組み合わせに対して、断面積 σ_i との分岐比 B_f の積 $(\sigma \times B)_{if}$ を測定した結果である。右の図は、さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合を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。

(2) ヒッグス粒子が2個同時に生成される過程の探索

ヒッグス粒子が2つ同時に生成される事象は、LHCでは図7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。

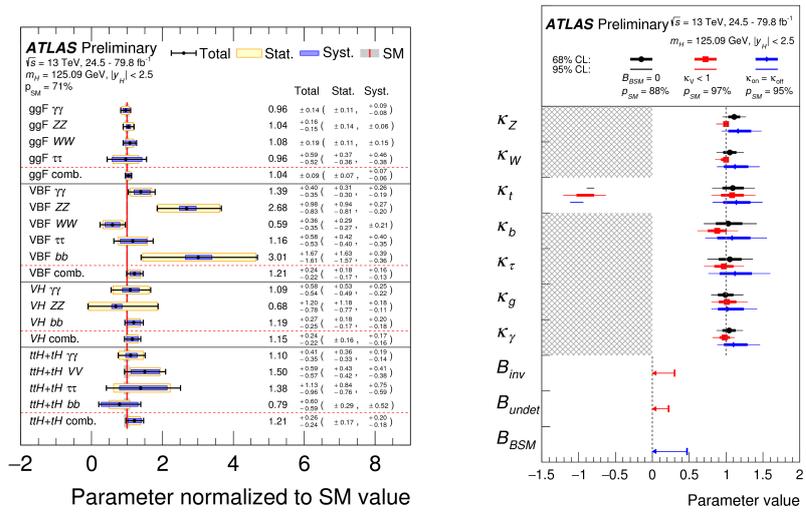


図 6: ATLAS 実験でのさまざまなヒッグス粒子解析の結果を総合的に解析した結果。(左) さまざまな生成、崩壊過程の組み合わせに対して、断面積と分岐比の積を測定した結果。結果は標準理論の予言値で規格化して表示している。(右) さまざまな粒子とヒッグス粒子の間の結合の測定結果を、標準理論の予言する結合の値で規格化して表示している。光子とグルーオンの結合も実効的な量として測定する。フィットは、ヒッグス粒子が標準理論通りの崩壊しかならない場合 (黒)、ヒッグス粒子の見えない粒子への崩壊の探索結果を考慮した場合 (赤)、オフシェルでの $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell/2\ell 2\nu$ 解析からのヒッグス粒子の質量幅への制約を考慮した場合 (青) の 3 通りで行った。

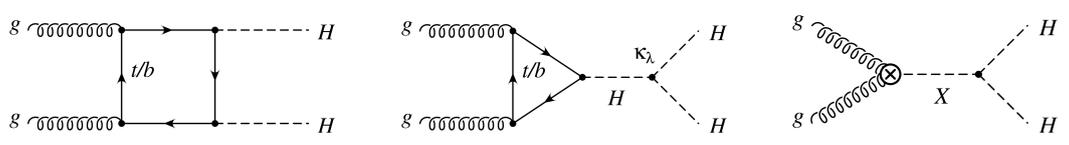


図 7: LHC でのヒッグス粒子 2 つが同時に生成される物理過程のダイアグラム。(左) クォークのループによる生成。(中) ヒッグス粒子の自己相互作用による生成。(右) 未発見の新粒子 X が 2 つのヒッグス粒子に崩壊する過程。

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。信号はまだ確認できておらず、データはバックグラウンドとよく一致した。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。全解析モードを合わせることで、標準理論が予言する生成断面積の 6.9 倍以上の断面積を棄却した。

(3) 標準理論を超えたヒッグス粒子の探索

標準理論では、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。一方で、有力視されている超対称性理論をはじめ、標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。荷電を持ったヒッグス粒子の存在も、多くの理論で示唆されている。とくに、200 GeV/c² 以上の質量の場合、荷電ヒッグス粒子はトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比が大きくなると予想されている。

2018 年には、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を Run-2 デー

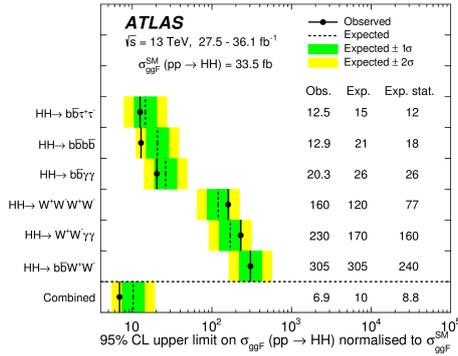


図 8: 2 ヒッグス過程の生成断面積に対して得られた上限。標準理論の予言値で規格化して表示している。

タ 36.1 fb^{-1} を使って探索したが、データがバックグラウンドの予想とよく一致しており、信号事象の有意な超過を観測しなかった。図 9 に、荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して本研究が与えた上限値、および棄却した h_{MSSM} シナリオでのパラメータ領域を示す。

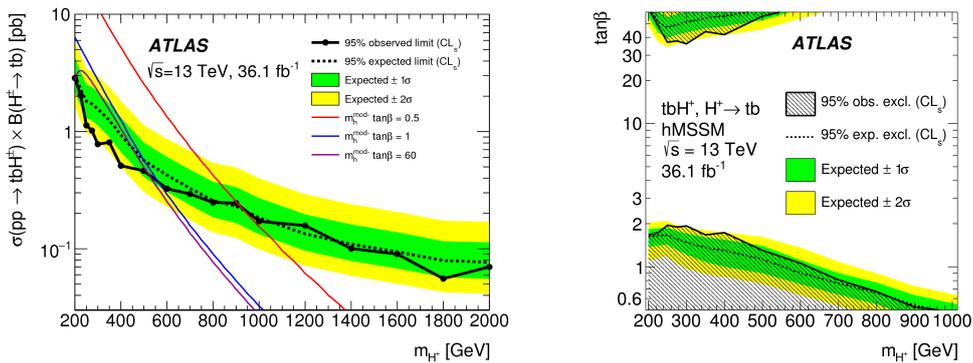


図 9: (左) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して得られた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。(右) h_{MSSM} シナリオに対する制約。

ATLAS 実験では、ここで記述した 2 ヒッグス過程や荷電ヒッグス粒子の探索以外にも多くの解析チャンネルで、既に発見されているのは別のヒッグス粒子を探索している。これらさまざまな直接探索解析の結果による h_{MSSM} シナリオに対する制約をまとめたのが図 10 である。

(4) ATLAS SCT シリコン検出器の運転

2018 年は Run2 データ収集の最後の年となったが、筑波大グループでは建設に大きな貢献をした SCT シリコン半導体ストリップ型検出器を主とした内部飛跡検出器の運転に継続して取り組んだ。

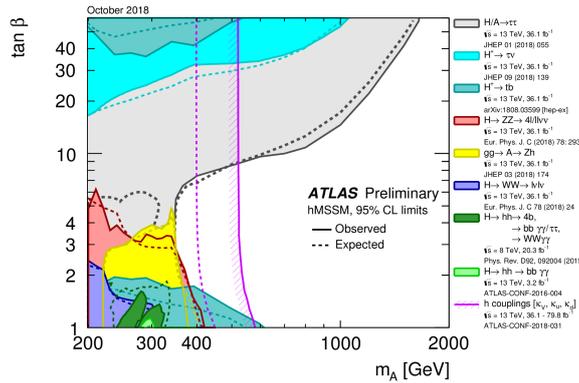


図 10: ATLAS 実験でのさまざまな解析による、 h_{MSSM} シナリオに対する制約。紫の斜線付きの曲線で表される棄却領域は、すでに発見できている $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子に関する測定から得られた間接的な制約。

(a) SCT 検出器の検出効率の評価

図 11 は 2018 年の運転期間における SCT 検出器の検出効率の推移を中央部（バレル部）と前後方部（エンドキャップ部）の 3 領域に分けて示すものである。検出効率は 99% 以上と高い値であるが、3 領域による違いや変動の原因を調査した。暫定的な Run2 終了時の検出効率は 99.5%、99.2% であるが、2009 年の 99.8% や Run1 終了時の 99.74% は領域に依らず、値としても差異がある。調査の結果、データ取得が一時停止するためのみかけの効率低下が 0.2%（バレル部）もしくは 0.4~0.5%（エンドキャップ部）があり、これらを考慮するとすべての領域で SCT 検出器本来の検出効率は 99.7% であり、従来の評価値と不変である。SCT は 10 年の運転期間にわたり高い効率を維持していることを示す重要なデータである。

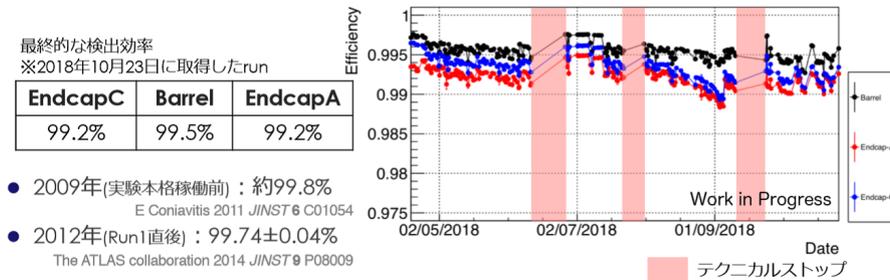


図 11: 右側に 2018 年の運転期間中の SCT 検出効率の推移を 3 つの検出器領域に分けて示す。Run2 終了時での暫定的な評価値と以前の評価値との比較を左に示す。詳細な評価により、SCT は 10 年の運転期間にわたり高い効率を維持していることが判明した。

(b) SCT 検出器総合効率のオンライン評価

ATLAS では収集データを約 1 分ごとに区分化した LumiBlock 単位で物理解析に用いることのできるデータ品質であるかを判断する。SCT では coverage という量を評価し、データ品質の指標に用いるが、これは衝突点から見込んだ SCT 検出面の正常動作割合であり単に検出効率だけでなくどの部分が動作していないかを考慮して総合的に評価する。図 12 左は

その目的のためにプログラムを開発し計算した coverage の、ある区間の推移を示す。SCT の異常は様々な要因があるが、図にはそれぞれの原因のモニターに基づき、異常個所の位置を特定して算定している様子が示されている。

(c) SCT 検出器のノイズ評価

シリコン検出器は放射線損傷のために特性が変化し、顕著な現象はバルク部の高抵抗 n 型シリコンが損傷により p 型に反転する。読み出し電極は低抵抗 p^+ で作製されているため、型反転後はセンサーを全空乏化しないと信号分離が失われる。不純物密度が増えることで全空乏化電圧は上昇するため、センサー耐圧（約 500 V）を超えると SCT の寿命となる。そのため、どのように放射線損傷を受けているかの理解は運転計画を大きく左右する。検出器のノイズ（入力電荷換算ノイズ ENC）は、ストリップ電極間の容量が大きく影響し、型反転前は少しのバイアス電圧で小さくなり一定値になるが、型反転後は、全空乏化を経てから減少する。図 12 右は、放射線の影響を受けやすいバレル部最内層での ENC のバイアス電圧依存性を時間とともに評価した結果である。2017 年 11 月のデータから型反転の兆候が現れ、時間を経て全空乏化電圧が上昇している様子が伺える。現在、暗電流などのデータも含めて総合的に放射線損傷の評価を進めている。

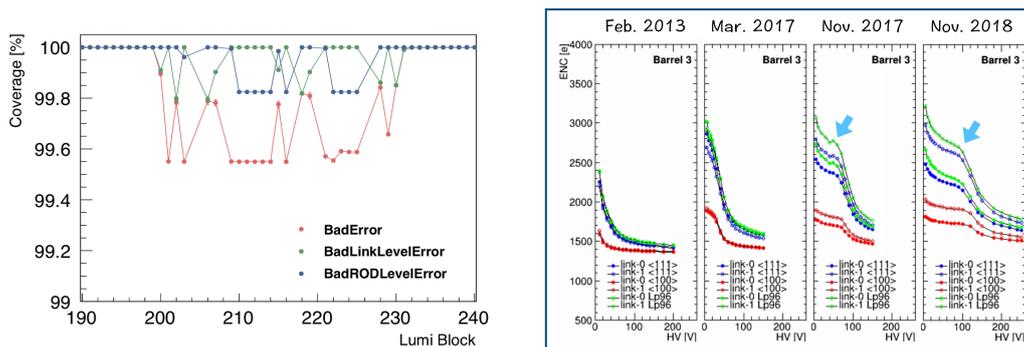


図 12: (左) あるデータ収集区間における SCT coverage の評価結果。これに基づき SCT が正常に動作し物理解析に使用できる状態であったかを判断する。(右) SCT 最内層 (Barrel 3) の入力電荷換算ノイズ (ENC) のバイアス電圧依存性をセンサーの配置と種類ごとに時間経過とともに示す。

【3】 HL-LHC ATLAS 実験用半導体センサーの開発

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え 4000 fb^{-1} のデータ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大する。ATLAS は 2016-17 年に内部飛跡検出器の技術設計書をまとめ、衝突点に近い内側 5 層には電極サイズが $50 \times 50 \mu\text{m}$ のピクセル型、その外側 4 層には $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$ のストリップ型のシリコン半導体検出器を配置する。

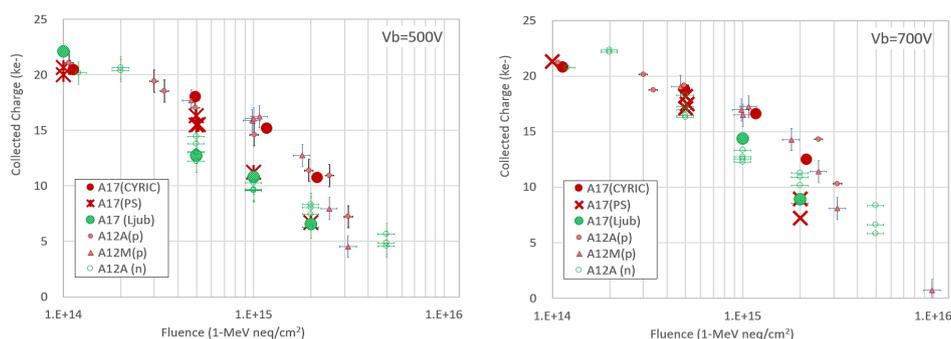


図 13: バレル部センサーの電荷収集量の測定結果. 陽子および中性子によるいくつかの機関による測定結果をまとめた. 図はバイアス電圧 500 V および 700 V での評価.

(1) HL-LHC 用 ATLAS ストリップ型センサー

2018 年度では ATLAS に使用できるセンサーを製造できる製造業者の技術選定がされた. そこではバレル部とエンドキャップ部を想定したセンサーが試作され, 放射線耐性を含んだ様々な性能評価を行った. 最終的な設計の外部レビュー (Final Design Review) は年度をまたいで 4 月 12 日に行われたが, バルク部の放射線耐性については原が総括した. 主な結果である電収集量の放射線による劣化を図 13 にまとめる.

日本グループは筑波大が中心となってバレル部センサーの半数の製造およびそれらの品質管理を分担する. センサーたわみの測定及びセンサー表面状態の撮影について, これらはセンサー製造工場で実施するために, 人手に頼らないフルオートメーション化は不可欠であり, オートフォーカス顕微鏡に基づく全自動計測システムの設計を行い部品調達を開始 FDR=した.

(2) HL-LHC 用 ATLAS ピクセル型センサー

ATLAS ではバレル部に 5 層のピクセルセンサーを設置するが, 放射線量の違いから, 最内層は 3D 技術によるもの, それ以外は通常のプラナー型ピクセルセンサーを用いる. 日本グループは 3~5 層目に使用できるバイアス構造のある n^+ -on-p 型プラナーピクセルセンサーの設計を進めてきた.

ピクセルセンサーおよび読み出し ASIC とのボンディング (フリップチップ化), 読み出しフレックスケール基板を取り付けたモジュール化までが日本グループの分担であるが, 筑波大学ではセンサーおよびフリップチップ化までを KEK と共同開発している. 2018 年度はプロトタイプ ASIC である RD53A を用いて, $50 \times 50 \mu\text{m}$ および $25 \times 100 \mu\text{m}$ のピクセルサイズのセンサーを試作しビーム試験評価をした.

日本グループが提案しているセンサー構造の特徴は, 各ピクセルがポリシリコンを用いた抵抗を介して共通電極 (バイアスレール) につながったバイアス構造を有していることである (図 14 左). フリップチップ化をすればセンサーのバイアス構造は不要となるが, プロセスコストの高いバンプボンドの前に不良センサーを判別するための手法としてバイアス構造は有効となる. ただし, バイアス抵抗のためにノイズがやや増える傾向にあり, バイアス抵抗値を高くするプロセスの採用や電極サイズの検討を行い, 図 14 右に示すように実際に

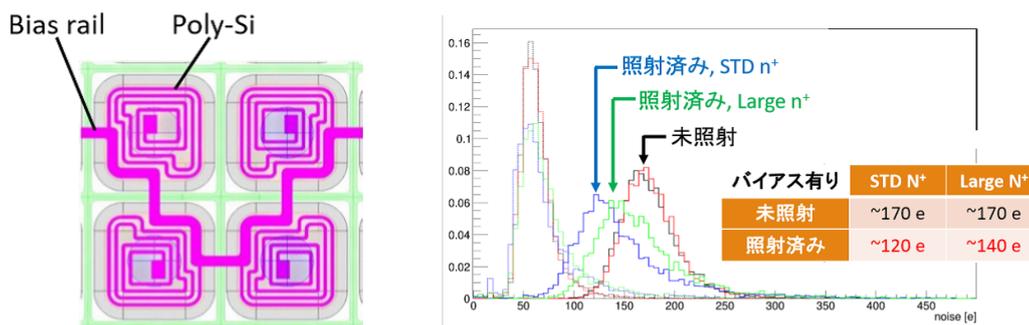


図 14: (左) $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のピクセルの設計. 各ピクセル電極はバイアスレールへポリシリコンで形成されるバイアス抵抗を介してつながる. (右) $50 \times 50 \mu\text{m}$ ピクセルセンサーと試作 ASIC である RD53A で読み出す検出器ノイズを $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ の照射損傷の前後で比較. センサー設計ではバイアス抵抗の有無に加えバイアス抵抗値の違いの効果などを評価している.

ノイズ分布を評価した. 放射線損傷前後でのノイズ特性も比較した. バイアス構造により有意な差異があるが, 製造プロセスの効率なども総合的に評価して今後仕様が決定される.

ピクセルモジュール製造については, 従来は ASIC へのパンプ形成は海外で行うことが想定されていたが, 国内企業を新たに検討に加え, フリップチップ化までを一貫して進められる体制を形成することをすすめた. フリップチップ化までの製造業者の技術選定を経て, FDR は 2019 年度に計画されている.

(3) $10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 照射後のシリコン検出器

HL-LHC 用に開発している 3 層目のピクセルセンサーは $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の放射線耐性が要求されるが, さらに内層では 10^{16} , もしくは将来の高輝度ハドロン衝突器 FCC (Future Circular Collider) では $10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達する. そのような高線量を受けたセンサー性能がどうのようになるか, ATLAS のストリップ型センサーを $10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで照射し実際に評価した. 評価内容はストリップセンサーに対して従来行っている項目をもとに選定した.

電荷収集量はすでに図 13 に示したように 10^{15} で約半分に減少する. キャリアの移動中の捕獲が主原因であり, 収集距離を短くすることが本質的に重要であることが従来より指摘されている. 図 15 左は, インプラント電極のパンチスルー特性を評価したもので, 10^{17} でも 90 V 以下で作動することが分かった. 照射とともに作動電圧は高くなるが, パンチスルー機能が保持されることは新たに判明した. 図 15 右はインプラント電極の抵抗値の変化である. 未照射および 10^{16} までは一定値であったものが 10^{17} では 50%程度ほど抵抗値が大きくなる. これはセンサー設計へのフィードバックが必要となる.

[4] 高時間分解能 LGAD 半導体センサー

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

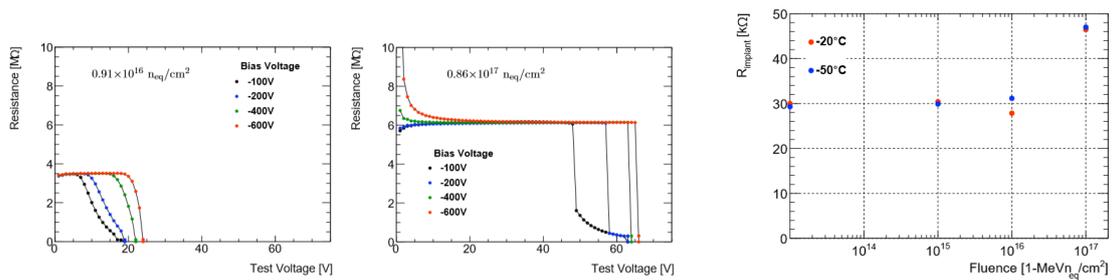


図 15: (左, 中) インプラント電極の共通電位への実効的抵抗値とインプラント電極に加えるテスト電圧との依存性. 約 10^{16} および $10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 照射後の結果. テスト電圧が低い領域ではバイアス抵抗 (未照射室温で $1.5 \text{ M}\Omega$ であるが, 照射とともにポリシリコン抵抗値は大きくなる) を表すが, パンチスルーが起こることで実効抵抗が減り, センサー酸化膜層および読み出しアンプを保護できる. (右) 約 16mm 長のインプラント電極抵抗値の照射量依存性.

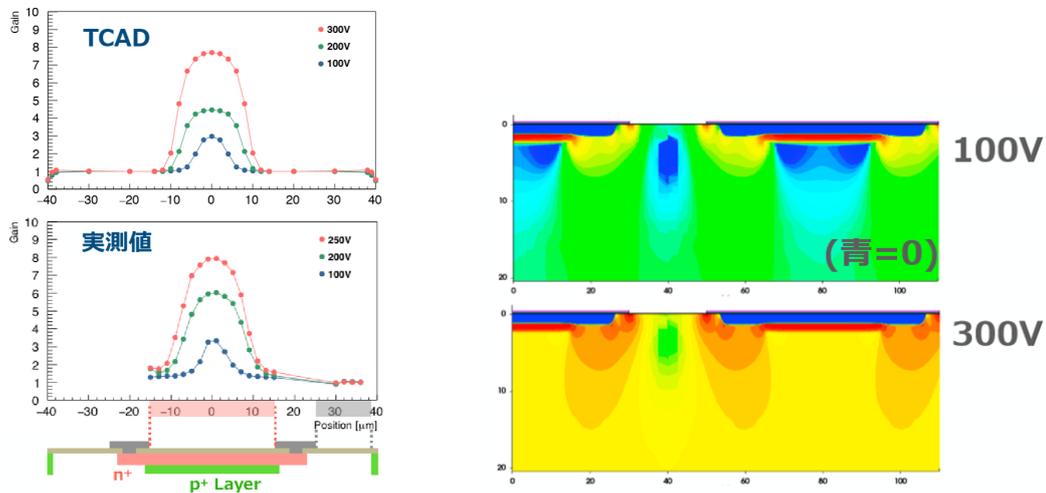


図 16: (左) 赤外レーザーを用いたストリップ型 LGAD の場所によるゲインの変化の測定結果と TCAD による再現. (右) TCAD によりアバランシェ増幅頻度分布をバイアス電圧 100 V と 300 V で比較 (青は頻度 = 0 を示す). これにより 300 V では n^+ 電極のエッジ部が高くセンサーブレイクダウンの原因となる.

あると考えている. 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.

2017 年度には試作したセンサーの時間分解能評価を FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いて行い, 30 ps を切る優れた時間分解能を達成した. 電極細分化としてストリップ形状を試作したが, p^+ 層の存在しない領域では当然増幅機能がなく, 集光したレーザーによる測定で図 16 左のような非一様性を示すことが分かった. この不感領域の振舞を定量的に評価するために TCAD (Technology CAD) を用いた. 非一様性を含む様々な測定データを再現するように TCAD のパラメータを決めて評価した非一様性の分布を測定結果と比較している, また, 300 V をかけるとストリップ型はブレイクダウンするが, その原因が n^+ 電極の端にあることを TCAD から同定した.

一様なゲインを保つ電極細分化の候補として, 電極をトレンチで物理的に分離する方法を

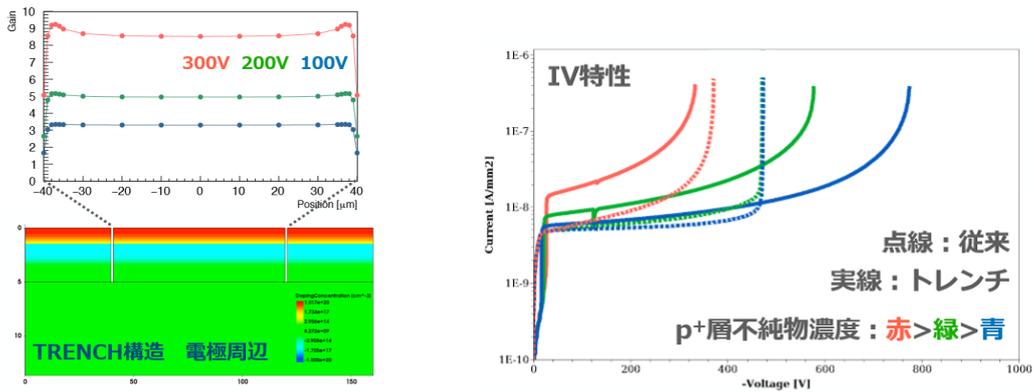


図 17: (左) トレンチによる電極分離構造で期待できるゲインの場所依存性. (右) センサーブレイクダウンの様子をトレンチ (実線) およびストリップ (破線) で比較. p^+ 濃度は三段階.

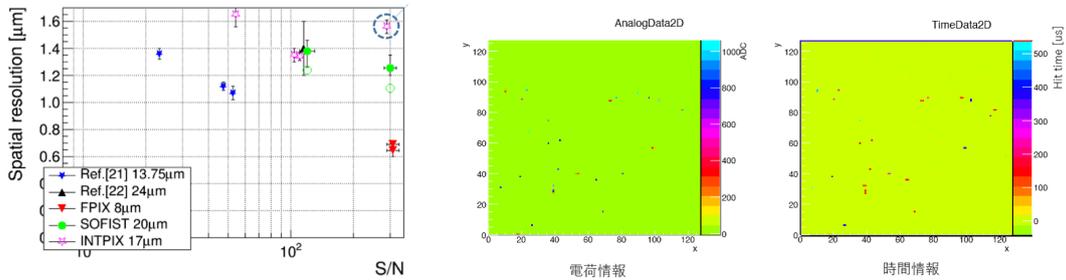


図 18: (左) INTPIX4 の位置分解能を S/N の関数として示す. 図には他の同程度のピクセルサイズのセンサーによる評価結果を示す. (右) ビームテストにおける SOFIST3 で記録された 1 フレーム分のデータ. ヒットピクセルは電荷量情報と時間情報の両方を与えていることが分かる.

評価した. 図 17 左は, トレンチにより電極全領域において一様なゲインが得られることを示す. また図 17 右は, ブレイクダウンの様子を示すもので, ストリップは低いゲインで急峻にブレイクするが, トレンチ分離ではなめらかな上昇であるため, 高いゲインを安定して得られる可能性がある結果が得られた.

これらの研究結果を受けて, 新たなセンサー試作を計画している.

国内での LGAD の開発研究は筑波大/KEK グループが主導している. 2018 年 12 月には, 「Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices」を筑波大学東京キャンパスで開催した. これは LGAD 検出器開発にワークショップで, 日米科学技術協力および筑波大宇宙史研究センターの後援により実施し, 海外からの 4 名を含む 17 名の参加者により高速半導体 LGAD 検出器の高エネルギー実験や PET への応用を議論した.

【5】 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. 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

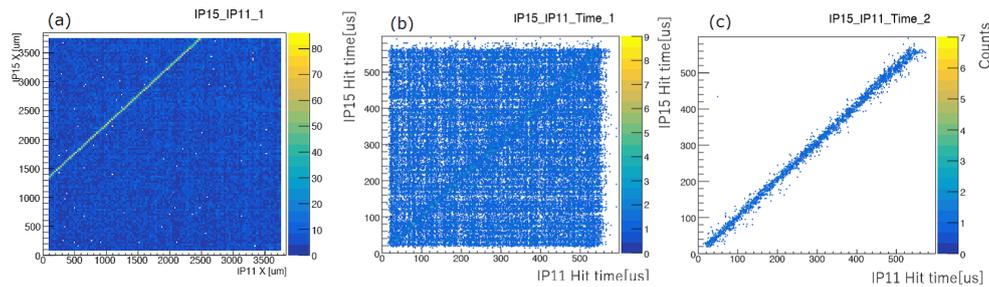


図 19: ビームテストにおける 2 枚の SOFIST3 チップの (左) ピクセルヒット X 座標の相関, (中) ピクセルヒット時間の相関, (右) X 座標相関を示す領域のみの時間相関.

検出器である。我々は 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、将来の加速器実験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

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、昨年度までに、最低 $1\ \text{MGy}$ までの放射線耐性があることを示すことに成功した。また、ピクセルサイズ $8\ \mu\text{m}$ の FPIX2 で、世界で初めて半導体検出器で $1\ \mu\text{m}$ を切る $0.65\ \mu\text{m}$ の空間分解能を 2017 年度に得ている。2018 年度は、国際リニア衝突器 ILC (International Linear Collider) 実験用に開発中の SOFIST を FNAL でテストビーム評価し、また、放射線耐性に関する基礎研究を継続した。

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」が平成 28 年度から開始され、以来、「3 次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」が KEK-筑波大-産総研を参加グループとして採択され、SOI を基軸としたより高機能のセンサー開発を目指した研究を継続している。

(1) 放射線損傷自動補正機能の基礎研究

SOI は回路層の活性層が $50\ \text{nm}$ と薄く FET は個別に酸化膜で絶縁されているために SEE(single event effect) に強い。しかし、周囲を酸化膜に囲われているので、移動度が低く、酸化膜に蓄積しやすい正電荷の影響を受けやすい。この TID 損傷に対しては、SOI2 層を設けて負電位を加えることで TID 損傷を補償する機構を従来より研究し、その有効性は確立した。しかし実用上は、TID に応じて補償電圧を調整する必要があり、それに対処する方法として、電荷蓄積の効果を FET の特性変化から直接評価し自動で調節できる機構の基礎研究に着手した。

(2) SOFIST のビーム試験

位置分解能に優れ、衝突時間も記録できるピクセル検出器を、ILC への適用を目指して開発している。2016 年度は FPIX とともに位置測定評価のための SOFISTv1 を試験し、2017 年度は時間分解能を SOFISTv2 (センサー厚 $70\ \mu\text{m}$)、ビーム飛跡再構成用大面積 INTPIX4 を用いて評価した。2018 年度は、SOFISTv3 と INTPIX7 による試験を行った。

図 18 左は、INTPIX4 の位置分解能を評価したものである。INTPIX4 はピクセルサイズが $17\ \mu\text{m}$ であり、電荷重心法でビーム位置を求めるため、位置分解能は信号ノイズ比 (S/N)

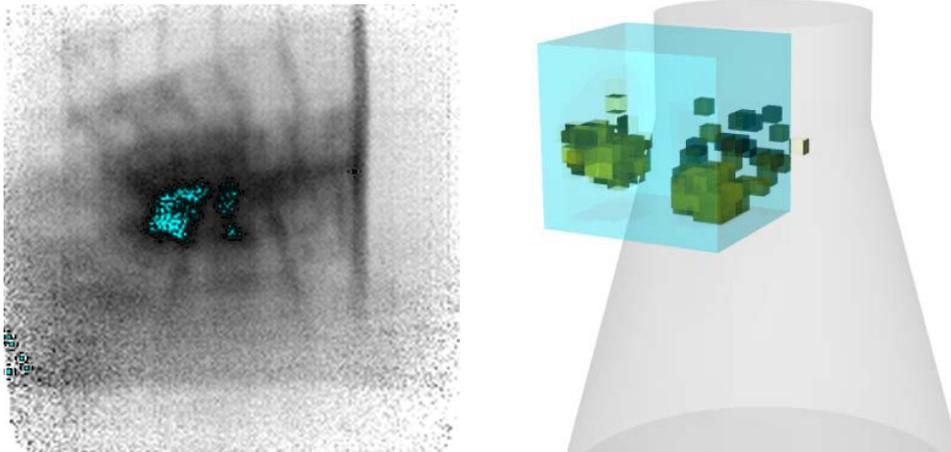


図 20: (左) 水平方向宇宙線ミュー粒子の運動量測定をするためのセットアップ. 5 層の位置検出器の間に鉄ブロックをはさみ, レンジ法により運動量を求めた. (右) 宇宙線ミュー粒子のフラックス. 天頂角 75° の領域では文献データと矛盾ない結果を得, 水平方向のデータを新たに加えた.

に依存することが分かっている. 図には同程度のピクセルサイズの他のデバイスとの比較が示されている. ピクセルサイズ $8\mu\text{m}$ の FPIX には及ばないが, $20\mu\text{m}$ の SOFIST2 と同等かやや良いという予想通りの分解能であることが示された. (1 サンプルだけ悪いが, 全体の位置調整 (アライメント) が十分でないことがデータから理解できている.)

SOFIST3 は時間と位置測定を同一ピクセルでできる最初のセンサーであり, ピクセルサイズは $30\mu\text{m}$ 角とやや大きい. 図 18 右にはあるフレーム (収集時間 1 ms) に通過した粒子の電荷と時間を色分けで示したピクセルマップである. 2 つの情報が対応して得られていることがわかる. 図 19 左には 2 枚の SOFIST3 センサーにヒットしたピクセルコラム番号の相関をヒット数を色で示している. センサーどうしの中心はややずれているが, 通過するビームによる相関が顕著に見える. また, 図 19 中は, 同じく 2 つの時間測定の相関でありこれもビームによる相関が見える. 例えば, 位置相関がある領域内のヒットを選択すると図 19 右に示すように, ランダムな組み合わせによるヒット点は排除される様子がわかる. 現在は SOFIST3 の時間分解能や位置分解能の評価を進めている.

【6】 福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミューオンによる観測

ミュー粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し, 宇宙線ミュー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 (ミューオンラジオグラフィー法). 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た. 2017 年度までに 1~3 号機のすべての測定を完了したので, TIA の光計測の枠組みを用いて行ってきた研究は 2018 年度が最後となる.

2018 年は予備実験として東海村の原電原子炉で 2011~2014 年にかけて行った計測結果の論文をまとめた. すでに 1 方向からの測定結果は PTEP に投稿・掲載済みであるが, 3 方向から測定し核燃料物質の分布を 3 次的に求めた結果を PTEP に投稿し受理された.

【7】 COBAND 実験

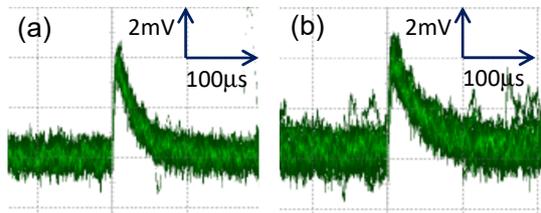


図 21: 電荷-電圧利得を向上した試作 SOI 電荷積分型増幅器の 0.49fC 電荷入力に対する出力信号波形。増幅器を (a) 冷凍機内の室温環境下、及び (b) 同 3K 環境下 (b) における測定結果がそれぞれ示されている。

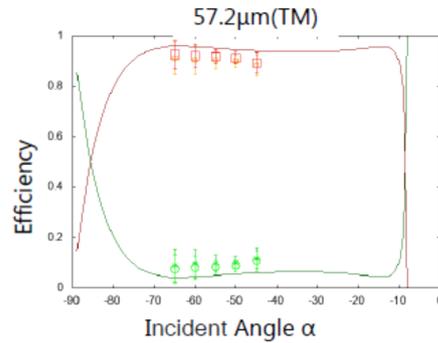


図 22: $57\ \mu\text{m}$ の TM 偏光レーザー光源に対する評価用回折光子の 0, 及び 1 次光回折強度比の実測データ (点), 及びシミュレーション (曲線) の比較。

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観測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 $\Delta = 1.55\ \text{meV}$, $T_c = 9.23\ \text{K}$) とアルミニウム ($\Delta = 0.172\ \text{meV}$, $T_c = 1.20\ \text{K}$) 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 ($\Delta = 20\ \mu\text{eV}$, $T_c = 0.165\ \text{K}$) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

現在、産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として 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おり、産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素子は、低漏れ電流性能をほぼ達成している。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いた増幅器の試作を行い、極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した。超伝導トンネル接合素子 STJ は、比較的大きな静電容量を持つため、その信号増幅には低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器が適している。そこで、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増幅器を FD-SOI プロセスにより設計・製作した。帰還容量により電荷-出力電圧利得を調整可能であるが 0.1eV エネルギー領域に合わせた増幅器において極低温冷凍機の $3\ \text{K}$ 環境での動作試験を実施し、室温で期待された増幅率約 4mV/fC に対し極低温でもほぼ変わらない増幅率を確認した (図 21)。また増幅器自体がもつ出力の入力換算雑音電荷の実測値は冷凍機内部での使用環境下において約 0.1fC と測定され、これは近赤外光の単一光子 ($h\nu \sim 1\text{eV}$) に対する STJ の応答電荷 1fC に対し十分小さく、この近赤外の単一光子に対する STJ の応答信号の増幅器として実用に足ることが確認された。実際の STJ 単一光子応答の増幅試験を現在準備中である。また利得の向上・入力換算雑音の改善にはまだ十分な余地があり、性能向上は十分可能である。

また、Hf-STJ の開発においては、ハフニウム層形成条件を見直し表面粗さの小さい条件を使用し、 150mK の温度での測定においてリーク電流密度を約 $3\text{nA}/\mu\text{m}^2$ までの低減を達成した。 50mK 以下の温度での測定で、リーク電流は更に改善することが見込まれ、現在韓

国 IBS のグループと共同研究により、無冷媒断熱消磁冷凍機を用いた 50mK 以下での測定、及び X 線源からの X 線に対する応答測定を行っている。

Nb/Al-STJ 単体では、25 meV の光子に対して必要なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の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。回折格子設計には、予想されるニュートリノ崩壊光の波長域（約 $50\mu\text{m}$ ）の波動光学シミュレーションが必要となるが、シミュレータソフトウェアの検証のため、福井大の遠赤外線分子レーザーを用いた評価用回折格子の回折効率の実測値とシミュレーションの比較を行った（図 22）。実測値とシミュレーションは振る舞いが良く一致しており、シミュレータの妥当性が示された。現在、シミュレータソフトウェアをもとにロケット望遠鏡光学系の設計の要求値に応じた回折格子の設計を行っている。

【8】 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノ研究に残された喫緊の課題は、質量の絶対値測定やマヨラナ性の検証であり、これは物質や宇宙の成り立ちを理解する上で欠かせない。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、これらを一気に解明しうる現実的に唯一の手段である。ニュートリノがマヨラナであった場合、粒子・反粒子は同一であり、片方の核子から出たニュートリノがもう一方に吸収される $0\nu\beta\beta$ が起こりうる。この崩壊率がニュートリノ有効質量の二乗に比例するため、 $0\nu\beta\beta$ の半減期から未だ不明なニュートリノ質量の測定も可能である。また、マヨラナ粒子は右巻きと左巻きでそれぞれ別の質量項を持つことが出来る。我々の世界では左巻きニュートリノしか観測出来ないが、右巻きニュートリノの非常に重い質量を考えると、振動実験で示唆される極端に小さいニュートリノ質量を自然に説明できる（シーソー機構）。さらに粒子数保存則が破れ、宇宙初期に生成された重い右巻きニュートリノの崩壊に CP の破れを考慮することで現在の物質優勢宇宙を説明することが出来る（レプトジェネシス）。

我々は大阪大学等と共同で岐阜県の神岡地下実験施設内に CANDLES 検出器を構築し、 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究を推進している。 ^{48}Ca は Q 値が 4.27 MeV と全核中最大であり、あらゆる自然放射線のベータ線、ガンマ線よりも高いため、超低バックグラウンド観測が実現可能である。CANDLES は岐阜県神岡の地下 1000 m に約 300 kg の CaF_2 シンチレータ結晶を 2 m^3 の液体シンチレータ中に沈め、周囲に 62 本の光電子増倍管を配置したプロトタイプ検出器（図 23）を作り、将来計画に向けたスタディを行っている。

2017 年には 131 日間の測定データを用いて、 ^{48}Ca に対して、これまでで世界最高感度を達成した。2018 年度は、この結果を国内外の会議で報告するとともに、低バックグラウンド測定を継続し、新たに 373 日分のデータを得ることに成功した。合計 504 日分のデータから得られたエネルギースペクトルを図 24 左に示す。これは Th 系列の放射性不純物量が $10\mu\text{Bq}$ 以下の高純度結晶を抽出した場合である。すべてのカットかけた後、Q 値領域（4.17 - 4.48 MeV）で残ったのは 1 事象であったが、これは Th 系列の放射性不純物含有量から予測されるバックグラウンド数と矛盾しない。この結果から ^{48}Ca の二重ベータ崩壊に対する世界最高感度を更新し続けている。

また、二重ベータ崩壊探索実験では、単一エネルギーの信号を探索するためエネルギー

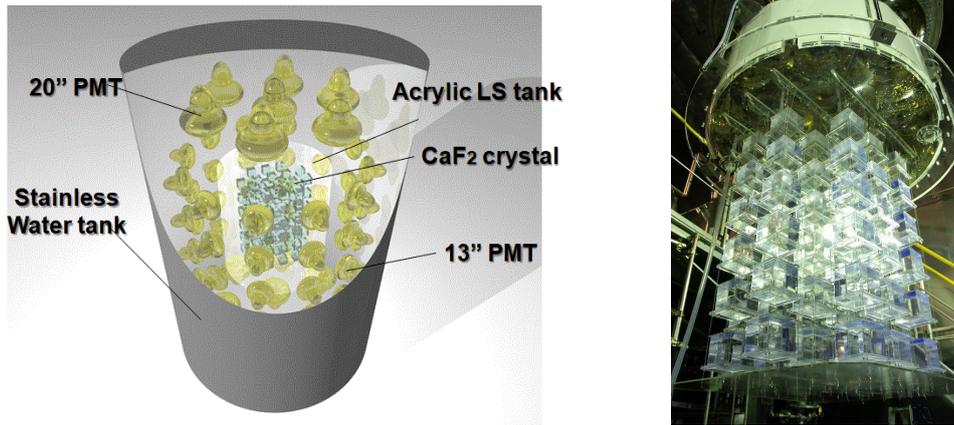


図 23: CANDLES 実験の概略図 (左) と CaF₂ 結晶の写真 (右)

ケールの較正が極めて重要である。しかし、⁴⁸Ca の場合、Q 値 (4.27 MeV) が高いため、標準的に使用できるガンマ線源では較正が難しく、系統誤差として問題になっていた。そこで我々は ²⁸Si や ⁵⁸Ni が中性子を捕獲した際に出すガンマ線を利用したエネルギー較正システムを開発した。これは Si や Ni の粉末をポリエチレンで固めてブロック状にし、複数個のブロックを検出器の上部に組み上げて中心に中性子線源を配置したものである。これにより、今まで 2.61 MeV で行っていた較正が、Q 値を挟むように複数の点で行うことが可能となった。2018 年度はこのシステムを用いて取られたデータの解析から、検出器の Q 値におけるエネルギースケールの精度の見積もりを行った。図 24 右はこの較正システムを用いて得られた結果である。横軸は今まで通り 2.61 MeV で較正されたエネルギーであり、下図の縦軸が各ガンマ線の再構成エネルギーが実際のエネルギーとどれだけずれているかを表している。これにより Q 値におけるエネルギースケールは 0.3% 以内で一致しており、十分な精度が確認された。

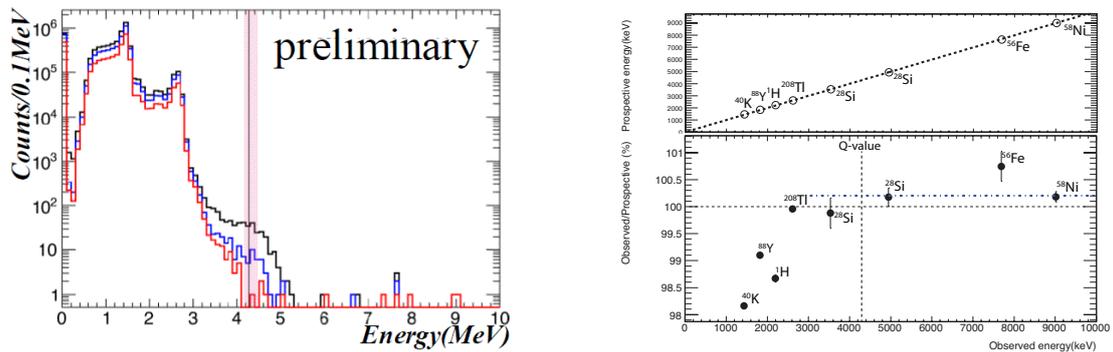


図 24: (左) CANDLES 実験で得られたエネルギースペクトル。各カットステップごとに載せているが、赤色の線が全てのカットをかけた後のスペクトルである。(右) 新エネルギー較正システムを導入して得られた結果で、3 MeV 以上の 4 点が新たに加わった較正点。上下とも横軸は 2.61 MeV で較正されたエネルギー、上図縦軸はガンマ線エネルギーの真のエネルギー (文献値)、下図縦軸は真のエネルギーと較正エネルギーの比である。

【9】 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。

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

2017 年度に作成した CaI_2 結晶で、 NaI(Tl) の 2.7 倍となる 107,000 ph./MeV を達成している。2018 年度には、その CaI_2 の波形弁別能力の調査を行った。暗黒物質や二重ベータ崩壊の探索実験においては、低バックグラウンド環境が極めて重要であり、無機シンチレータでは粒子毎の波形の違いを用いた波形弁別法によって信号とバックグラウンドを分離して、低バックグラウンド環境を実現する方法が一般的に用いられる。作製した結晶 (図 25 左上) をドライルーム内で $5\times 5\times 1$ mm 程度のサイズに切り出し、図 25 左下のように光電子増倍管で光信号を読みだした。アルファ線源として ^{241}Am 、ガンマ線源として ^{137}Cs を用いて、その波形を 400 MHz サンプリングレートの Waveform digitizer で取得し、データ解析を行い比較した。それぞれ 1 万事象のデータを取得し、平均波形を作成したものを図 25 右に示す。赤がアルファ線、黒がガンマ線を照射した際の波形だが、特に最初の 300 ns に大きな違いがあることを発見した。これは CaI_2 が非常に高い波形弁別能を持つことを示唆しており、現在詳細な解析をすすめているところである。

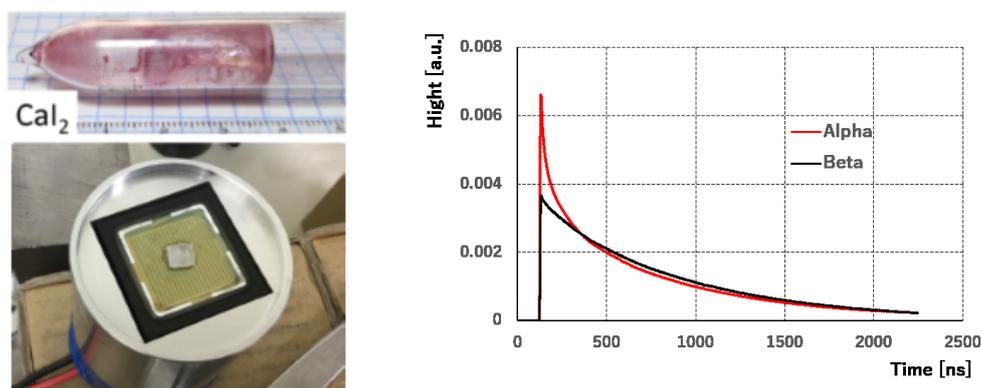


図 25: 作成した CaI_2 結晶 (左上) を切り出して、光電子増倍管上に設置した (左下)。右図は、アルファ線 (赤) とガンマ線 (黒) を照射した際の平均波形。

上記の通り、 CaI_2 結晶が非常に高いシンチレータ特性を示す一方で、劈開性が極めて強く加工や取り扱いが困難であることも分かっている。そこで我々は、 CaI_2 のヨウ素 (I) を一

部臭素 (Br) で置き換えた、 $\text{CaBr}_{2-x}\text{I}_x$ の開発も並行して進めることにした。 CaI_2 と同様の石英封止型ブリッジマン法を用い作製した Eu 添加 $\text{CaBr}_{0.7}\text{I}_{1.3}$ 結晶を図 26 左に示す。一部を Br で置き換えることにより劈開性が弱まり、5 mm 角で切り出すことに成功した。図 26 右は、横軸が $\text{CaBr}_{2-x}\text{I}_x$ の x の値、縦軸が発光量の関係である。組成を変えて何種類か試した結果、ヨウ素の割合が多い方が、発光量が大きくなることが判明した。また、Eu ドープの有無を比較した場合、Br を混ぜたものでは、Eu をドープした方が、発光量が大きくなることも分かった。加工性と発光量を考慮し、今後は Br と I が 1:1 である CaBrI の大型化を目指していく。

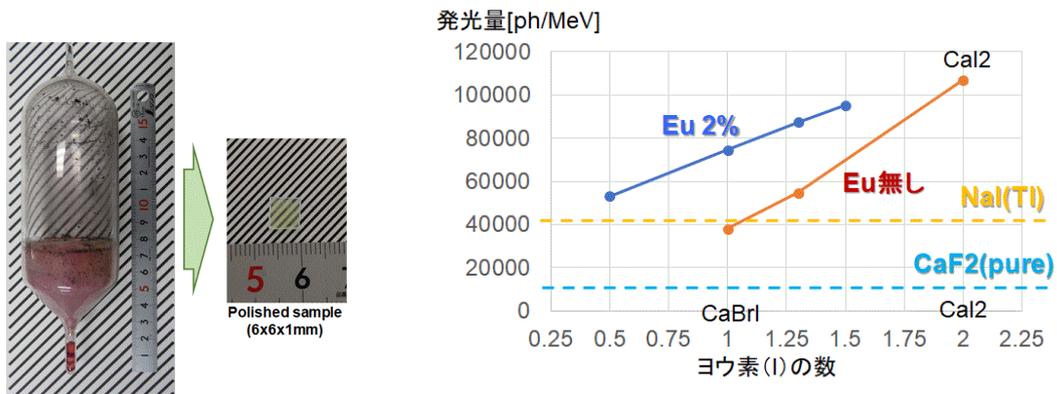


図 26: (左) 作成した $\text{CaBr}_{0.7}\text{I}_{1.3}$ 結晶。劈開性が弱まったため、加工が可能となった。(右) 横軸が $\text{CaBr}_{2-x}\text{I}_x$ の x の値、縦軸が発光量の関係。青が Eu ドープ有、オレンジが Eu ドープ無である。比較のため、 NaI(Tl) と CaF_2 の発光量を載せている。

【10】 競争的資金

1. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「半導体 SOI 回路と超伝導検出器 STJ の融合による革新的高感度検出器の開発」 2016 – 2018 年度, 研究代表者: 武内勇司
1,300 千円 (直接経費 1,000 千円, 間接経費 300 千円) (2018 年度)
2. 科学研究費 基盤研究 (B)「高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
7,280 千円 (直接経費 5,600 千円, 間接経費 1,680 千円) (2018 年度)
3. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「ハフニウム超伝導体を用いた究極の感度を持つ超伝導検出器への挑戦」 2018 – 2019 年度, 研究代表者: 飯田崇史
3,120 千円 (直接経費 2,400 千円, 間接経費 720 千円) (2018 年度)
4. 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 – 2021 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
3,900 千円 (直接経費 3,000 千円, 間接経費 900 千円) (2018 年度)
5. 新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」 2018 年, 研究分担者: 武内勇司, 51.5 千円 (直接経費 50 千円, 間接経費 1.5 千円) (2018 年度)

【11】 受賞

1. 本多俊介: 第 13 回 (2019 年) 日本物理学会若手奨励賞 素粒子実験領域,
”Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector” (博士論文, 筑波大学, 2018 年)
2. 金信弘: 2018 年度 (第 42 回) 成和記念財団「金萬有学術賞」,
「2TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップクォークの発見, Bc 中間子の発見, および Bs 中間子の粒子反粒子振動の初観測をはじめとする素粒子物理の研究」
3. 和田冨: 2018 年度 筑波大学 数理物質科学研究科 研究科長表彰,
「4次元飛跡検出のための内部増幅機能付き半導体検出器 LGAD の基礎研究」(修士論文, 筑波大学, 2019 年)

【12】 研究発表

(1) 原著論文

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “Search for Higgs-like particles produced in association with bottom quarks in proton-antiproton collisions,” *Phys. Rev. D* **99**, no. 5, 052001 (2019).

2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the differential cross sections for W -boson production in association with jets $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,” *Phys. Rev. D* **98**, 112005 (2018).
3. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “Search for standard-model Z and Higgs bosons decaying into a bottom-antibottom quark pair in proton-antiproton collisions at 1.96 TeV,” *Phys. Rev. D* **98**, 072002 (2018).
4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Tevatron Run II combination of the effective leptonic electroweak mixing angle,” *Phys. Rev. D* **97**, 112007 (2018).
5. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “A search for the exotic meson $X(5568)$ with the Collider Detector at Fermilab,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 202006 (2018).
6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Combined Forward-Backward Asymmetry Measurements in Top-Antitop Quark Production at the Tevatron,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 042001 (2018).
7. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, T. Yoshida *et al.* [CDF Collaboration], “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with the full CDF Run II data set,” *Phys. Rev. D* **87**, no. 7, 072003 (2013) Erratum: [*Phys. Rev. D* **97**, 099901 (2018)].
8. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $Z\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings,” *JHEP* **1812**, 010 (2018).
9. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comparison between simulated and observed LHC beam backgrounds in the ATLAS experiment at $E_{\text{beam}} = 4$ TeV,” *JINST* **13**, no. 12, P12006 (2018).
10. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ decays and VH production with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **786**, 59 (2018).
11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles produced in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 12, 997 (2018).

12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1811**, 085 (2018).
13. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of the searches for pair-produced vector-like partners of the third-generation quarks at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, no. 21, 211801 (2018).
14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 5, 052008 (2018).
15. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092005 (2018).
16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on off-shell Higgs boson production and the Higgs boson total width in $ZZ \rightarrow 4\ell$ and $ZZ \rightarrow 2\ell 2\nu$ final states with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **786**, 223 (2018).
17. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, no. 19, 191801 (2018). Erratum: [Phys. Rev. Lett. **122**, no. 8, 089901 (2019)]
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with same-charge leptons and b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1812**, 039 (2018).
19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with a hadronically decaying vector boson and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 180 (2018).
20. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs bosons produced via vector-boson fusion and decaying into bottom quark pairs in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 5, 052003 (2018).
21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma WW^*$

channel using pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 12, 1007 (2018).

22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ in the τ +jets and τ +lepton final states with 36 fb^{-1} of pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” JHEP **1809**, 139 (2018).
23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavor violation in different-flavor, high-mass final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092008 (2018).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson pair production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ final state with 13 TeV pp collision data collected by the ATLAS experiment,” JHEP **1811**, 040 (2018).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Prompt and non-prompt J/ψ elliptic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 9, 784 (2018).
26. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into $J/\psi\gamma$, $\psi(2S)\gamma$, and $\Upsilon(nS)\gamma$ at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **786**, 134 (2018).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair- and single-production of vector-like quarks in final states with at least one Z boson decaying into a pair of electrons or muons in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Phys. Rev. D **98**, no. 11, 112010 (2018).
28. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of centrality-dependent acoplanarity for muon pairs produced via two-photon scattering in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, no. 21, 212301 (2018).
29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying into two spin-zero particles in the $H \rightarrow aa \rightarrow 4b$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 031 (2018).
30. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the quantum interference between singly and doubly resonant top-quark production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. Lett. **121**, no. 15, 152002 (2018).

31. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of higgsinos in final states with at least three b -tagged jets in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 9, 092002 (2018).
32. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Operation and performance of the ATLAS Tile Calorimeter in Run 1,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 12, 987 (2018).
33. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for chargino-neutralino production using recursive jigsaw reconstruction in final states with two or three charged leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 9, 092012 (2018).
34. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying into high- p_T W bosons and top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1808**, 048 (2018).
35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonant WZ production in the fully leptonic final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **787**, 68 (2018).
36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **784**, 173 (2018).
37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels with $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **784**, 345 (2018).
38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena using the invariant mass distribution of same-flavour opposite-sign dilepton pairs in events with missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 8, 625 (2018).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combined measurement of differential and total cross sections in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channels at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **786**, 114 (2018).
40. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in the mass distribution of jet pairs

with one or two jets identified as b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 032016 (2018).

41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **98**, no. 2, 024908 (2018).
42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of dijet azimuthal decorrelations in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and determination of the strong coupling,” Phys. Rev. D **98**, no. 9, 092004 (2018).
43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the suppression and azimuthal anisotropy of muons from heavy-flavor decays in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **98**, no. 4, 044905 (2018).
44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavor-changing neutral currents in top quark decays $t \rightarrow Hc$ and $t \rightarrow Hu$ in multilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032002 (2018).
45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Angular analysis of $B_d^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 047 (2018).
46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Prompt and non-prompt J/ψ and $\psi(2S)$ suppression at high transverse momentum in 5.02 TeV Pb+Pb collisions with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 9, 762 (2018).
47. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of colour flow using jet-pull observables in $t\bar{t}$ events with the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 10, 847 (2018).
48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with charm jets and missing transverse momentum in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1809**, 050 (2018).
49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a photon and a hadronically decaying $Z/W/H$ boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, no. 3, 032015 (2018).

50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of b-jet tagging efficiency with the ATLAS detector using $t\bar{t}$ events at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *JHEP* **1808**, 089 (2018).
51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy particles decaying into top-quark pairs using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 7, 565 (2018).
52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for lepton-flavor-violating decays of the Z boson into a τ -lepton and a light lepton with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 092010 (2018).
53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for R-parity-violating supersymmetric particles in multi-jet final states produced in p - p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **785**, 136 (2018).
54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 3, 032009 (2018).
55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for low-mass dijet resonances using trigger-level jets with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 8, 081801 (2018).
56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, 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 $\ell\ell b\bar{b}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **783**, 392 (2018).
57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays into pairs of light (pseudo)scalar particles in the $\gamma\gamma jj$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **782**, 750 (2018).
58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks decaying to tau sleptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 3, 032008 (2018).
59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current top-quark decays $t \rightarrow qZ$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1807**, 176 (2018).

60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of up-type vector-like quarks and for four-top-quark events in final states with multiple b -jets with the ATLAS detector,” JHEP **1807**, 089 (2018).
61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of supersymmetric particles in final states with two or three leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 12, 995 (2018).
62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 11, 903 (2018).
63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of differential cross sections of top quark pair production in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” JHEP **1810**, 159 (2018).
64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Decay of the Higgs Boson to Charm Quarks with the ATLAS Experiment,” Phys. Rev. Lett. **120**, no. 21, 211802 (2018).
65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **98**, 052005 (2018).
66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays to beyond-the-Standard-Model light bosons in four-lepton events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” JHEP **1806**, 166 (2018).
67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, no. 9, 092006 (2018).
68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a Structure in the $B_s^0\pi^\pm$ Invariant Mass Spectrum with the ATLAS Experiment,” Phys. Rev. Lett. **120**, no. 20, 202007 (2018).
69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for $W' \rightarrow tb$ decays in the hadronic final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **781**, 327 (2018).

70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for High-Mass Resonances Decaying to $\tau\nu$ in pp Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, no. 16, 161802 (2018).
71. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $t\bar{t}$ differential cross-sections of highly boosted top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 1, 012003 (2018).
72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross section for isolated-photon plus jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **780**, 578 (2018).
73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 7, 072016 (2018).
74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 7, 072003 (2018).
75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 5, 052010 (2018).
76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section of three isolated photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **781**, 55 (2018).
77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive and fiducial $t\bar{t}$ production cross-sections in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 487 (2018).
78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into a W or Z boson and a Higgs boson in final states with leptons and b -jets in 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **1803**, 174 (2018). Erratum: [*JHEP* **1811**, 051 (2018).]
79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy ZZ resonances in the $\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ and

$\ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$ final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 4, 293 (2018).

80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for exclusive Higgs and Z boson decays to $\phi\gamma$ and $\rho\gamma$ with the ATLAS detector,” *JHEP* **1807**, 127 (2018).
81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 11, 112001 (2018).
82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson coupling properties in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1803**, 095 (2018).
83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1806**, 022 (2018).
84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross-sections of a single top quark produced in association with a W boson at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 3, 186 (2018).
85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector,” *JHEP* **1806**, 108 (2018).
86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Soft-Drop Jet Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 9, 092001 (2018).
87. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector,” *JHEP* **1801**, 126 (2018).
88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, 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* **1805**, 077 (2018).

89. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive jet and dijet cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1805**, 195 (2018).
90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and multiple b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1806**, 107 (2018).
91. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with bottom or top quarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 1, 18 (2018).
92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for doubly charged Higgs boson production in multi-lepton final states with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 3, 199 (2018).
93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of differential cross sections of isolated-photon plus heavy-flavour jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **776**, 295 (2018).
94. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for WW/WZ resonance production in $l\nu qq$ final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1803**, 042 (2018).
95. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for pair-produced resonances in four-jet final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 3, 250 (2018).
96. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for B-L R -parity-violating top squarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 3, 032003 (2018).
97. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 5, 052012 (2018).
98. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of a single

top quark in association with a Z boson in protonproton collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **780**, 557 (2018).

99. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying into WW in the $e\nu\mu\nu$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 1, 24 (2018).
100. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in high-mass final states with a photon and a jet from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 2, 102 (2018).
101. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ $ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell'^+\ell'^-$ cross-section measurements and search for anomalous triple gauge couplings in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **97**, no. 3, 032005 (2018).
102. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in 36 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1801**, 055 (2018).
103. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for resonances decaying into a Higgs boson and a new particle X in the $XH \rightarrow qqbb$ final state with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **779**, 24 (2018).
104. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Combination of inclusive and differential $t\bar{t}$ charge asymmetry measurements using ATLAS and CMS data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” JHEP **1804**, 033 (2018).
105. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Direct top-quark decay width measurement in the $t\bar{t}$ lepton+jets channel at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 2, 129 (2018).
106. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of τ polarisation in $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ decays in protonproton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 2, 163 (2018).
107. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of quarkonium production in protonlead and protonproton collisions at 5.02 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 3, 171 (2018).

108. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of longitudinal flow decorrelations in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 2, 142 (2018).
109. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy ZZ and ZW resonances in the $\ell\ell qq$ and $\nu\nu qq$ final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1803**, 009 (2018).
110. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an invisibly decaying Higgs boson or dark matter candidates produced in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **776**, 318 (2018).
111. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the direct production of charginos and neutralinos in final states with tau leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 2, 154 (2018).
112. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for diboson resonances with boson-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **777**, 91 (2018).
113. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the exclusive $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ process in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **777**, 303 (2018).
114. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of long-range multiparticle azimuthal correlations with the subevent cumulant method in pp and $p + Pb$ collisions with the ATLAS detector at the CERN Large Hadron Collider,” *Phys. Rev. C* **97**, no. 2, 024904 (2018).
115. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a new heavy gauge boson resonance decaying into a lepton and missing transverse momentum in 36 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 5, 401 (2018).
116. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in 5.02 TeV proton-lead and proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. A* **978**, 65 (2018).
117. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W -boson mass in pp collisions at

$\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **78**, no. 2, 110 (2018).
Erratum: [Eur. Phys. J. C **78**, no. 11, 898 (2018).]

118. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section for producing a W boson in association with a single top quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ATLAS,” JHEP **1801**, 063 (2018).
119. 原和彦, 中村浩二, LGAD ワークショップ: Fast-timing 半導体検出器の開発と応用”, 高エネルギーニューズ 37-4 (192) 2019.
120. S. H. Kim, Y. Takeuchi, K. Takemasa, K. Nagata, K. Kasahara, S. Yagi, R. Wakasa, R. Senzaki, K. Moriuchi, C. Asano, S. B. Kim *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment,” Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017), SPPHY **213**, 242 - 248 (2018).
121. K. Takemasa, S. H. Kim, Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector Using Hafnium for COBAND Experiment,” Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017), SPPHY **213**, 254 - 258 (2018).
122. S. H. Kim *et al.* (COBAND collaboration), “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,” 観測ロケットシンポジウム 2018 講演集 Proceedings of Sounding Rocket Symposium 2018 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/897525>. SA6000127012, IV-2 (2018), (Online edition)(査読なし).
123. M. Anderson, T. Iida, *et al.*, “Search for invisible modes of nucleon decay in water with the SNO+ detector”, Phys. Rev. D **99**, 032008 (2019)
124. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, “Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment”, Astroparticle Physics, Volume 100, July 2018, Pages 54-60.

(2) 学会・研究会での講演・ポスター発表（国内）

1. 飯田崇史: 「新規シンチレータによるニュートリノ物理」
Scintillator for Medical, Astroparticle and Environmental Radiation Techniques 2017 (SMART2018), 2018 年 5 月 18 日, 沖縄科学技術大学院大学. (招待講演)
2. 武政健一: COBAND 実験に向けた超伝導検出器の開発,
宇宙史研究センター第 1 回構成員会議・成果報告会 (2018 年 6 月 4 日), 筑波大学. (一般講演)
3. 武内勇司: COBAND プロジェクト,
宇宙史研究センター第 1 回構成員会議・成果報告会 (2018 年 6 月 4 日), 筑波大学. (招待講演)

4. 若狭玲那：COBAND 実験に向けた極低温電荷積分型前置増幅器の研究開発，
埼玉大学 素粒子論研究室セミナー (2018 年 6 月 8 日)，埼玉大学。(セミナー)
5. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験，
ISAS 観測ロケットシンポジウム (2018 年 7 月 17-18 日)，JAXA/ISAS。(一般講演)
6. 飯田崇史：「新規高性能シンチレータによる宇宙史研究」
関西学院大学理工学部講演会，2018 年 6 月 13 日， 関西学院大学三田キャンパス。(招待講演)
7. 大鳴匡至：HL-LHC に向けた初期量産型 ATLAS ストリップ型検出器の放射線耐性の
評価，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
8. 佐藤構二：ATLAS 実験での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，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
9. 内山和貴：ATLAS 検出器増強に向けた新型 ASIC 搭載ピクセルセンサーモジュール
の性能評価，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
10. 原田大豪：ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセルセンサーモジュールの閾
値の評価，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
11. 和田冴：内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の時間分解能測定法最適化に関するテスト
ビームデータを用いた研究，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
12. 山内大輝：大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 を用いたビーム飛跡再構成性能の評
価，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
13. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 IV，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)
14. 笠島誠嘉：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 VIII，
日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 14-17 日)， 信州大学松本キャンパス。
(一般講演)

15. 飯田崇史：COBAND 実験のための光学系設計開発 I,
日本物理学会 2018 年秋季大会（2018 年 9 月 14-17 日），信州大学松本キャンパス。
（一般講演）
16. 飯田崇史：「宇宙史研究のための CaI2 シンチレータ開発の現状 II」
日本物理学会 2018 年秋季大会（2018 年 9 月 14 日-17 日），信州大学松本キャンパス。
（一般講演）
17. 山内 大輝，原和彦，他：Study of tracking performance of large-area INTPIX4 SOI
pixel sensor,
第 1 回量子線イメージング研究会（2018 年 9 月 25 日-26 日），京都大学。（ポス
ター発表）
18. 岩波四季恵，安部竜平，原和彦，他：SOI 技術を用いた高精細ピクセル検出器の特性
評価，
第 1 回量子線イメージング研究会（2018 年 9 月 25 日-26 日），京都大学。（ポス
ター発表）
19. 村山仁志，渡辺圭敏，原和彦，他：Study of basic charactersitics of SOFIST sensors,
第 1 回量子線イメージング研究会（2018 年 9 月 25 日-26 日），京都大学。（ポス
ター発表）
20. 原和彦：Development and operation of pixel detectors at the LHC ATLAS experi-
ment,
SOI ピクセル研究会（2018 年 11 月 19 日），つくば国際会議場。（招待講演）
21. 飯田崇史：COBAND 実験報告，
宇宙史研究センター第 2 回構成員会議・成果報告会（2018 年 11 月 22 日），筑波大学。
（招待講演）
22. 飯田崇史：「素粒子地下実験入門：日本のニュートリノ研究最前線」
徳島大学物理学科セミナー，2018 年 12 月 14 日，徳島常三島キャンパス。（セミナー）
23. 内山和貴：RD53A モジュールの基礎特性評価，
AJ シリコンワークショップ（2018 年 12 月 21 日-22 日），九州大学。
24. 原田大豪：RD53A の閾値実測と照射後センサーの全空乏化電圧の評価，
AJ シリコンワークショップ（2018 年 12 月 21 日-22 日），九州大学。
25. 大鳴匡至：Survey of strip sensor，
AJ シリコンワークショップ（2018 年 12 月 21 日-22 日），九州大学。
26. 原和彦：Preparation of strip sensor production，
AJ シリコンワークショップ（2018 年 12 月 21 日-22 日），九州大学。
27. 飯田崇史：「二重ベータ崩壊探索実験のための新規シンチレータ開発」
第 33 回放射線検出器とその応用，2019 年 1 月 29 日，高エネルギー加速器研究機構小
林ホール。（一般講演）

28. 飯田崇史：「ダブルベータ」
核物理将来 WG 第 4 回研究会 (2019 年 1 月 31 日-2 月 1 日), 高エネルギー加速器研究機構 4 号館. (招待講演)
29. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験,
核物理将来 WG 第 4 回研究会 (2019 年 1 月 31 日-2 月 1 日), KEK. (招待講演)
30. 武内勇司：R&D of FIR quantum photo-sensors based on STJs for COBAND,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
31. 辻悠汰：”アンテナ構造付 Nb/Al-STJ の品質評価,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
32. 武政 健一：遠赤外一光子分光のための Hf-STJ 開発,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
33. 寺田 侑史：STJ 信号増幅及び SOI-FET 極低温動作,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
34. 笠島 誠嘉：STJ 信号増幅のための電荷積分型極低温 SOI 増幅器の開発,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
35. 高橋 光太郎：遠赤外域分光光学系の開発,
第 1 回 TCHoU ワークショップ (2019 年 2 月 4-5 日), 筑波大学. (招待講演)
36. 和田 冴, 原和彦, 他：高時間分解能・位置分解能を達成できる 4 次元半導体検出器の
開発,
第 3 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場.
(ポスター発表)
37. 山内 大輝, 原和彦, 他：SOI 技術を用いた高位置・時間分解能を有するモノリシック
型ピクセル検出器 SOFIST の開発研究,
第 3 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場.
(ポスター発表)
38. 佐藤 勝哉, 原和彦, 他：高放射線照射されたシリコン半導体量子検出器の性能評価,
第 3 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場.
(ポスター発表)
39. 高橋光太郎, 他：COBAND 実験に向けた STJ 遠赤外領域単一光子分光検出器の開発,
第 3 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 2 月 8 日), つくば国際会議場.
(ポスター発表)
40. 高橋光太郎, 辻悠汰, 寺田侑史：(ポスター発表)COBAND 実験に向けた STJ 遠赤外
領域単一光子分光検出器の開発,
第 4 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2019 年 3 月 8 日), つくば国際会議場. (ポスター)
41. 和田冴：内部増幅機能付き検出器 (LGAD) 開発に向けた基礎研究,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)

42. 大鳴匡至：内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) のビームテストに用いるテレスコープの位置分解能の評価,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
43. 本多俊介: ATLAS 検出器を用いたトップクォーク・ヒッグス粒子随伴生成の $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊様式での探索,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(日本物理学会 若手奨励賞受賞記念講演)
44. 若狭玲那: LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるシリコンストリップ検出器の検出効率の測定,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
45. 内山和貴: ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器のノイズ評価,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
46. 原田大豪: ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器の放射線照射後の性能評価,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
47. 村山仁志: 精密な位置・時間計測が可能な SOI ピクセルセンサー SOFIST3 のテストビームを用いた性能評価,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
48. 山内大輝: 大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 における飛跡再構成性能評価,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
49. 岩波四季恵: 大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器を用いたビーム飛跡検出のための開発研究,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学 伊都キャンパス.
(一般講演)
50. 高橋光太郎: COBAND 実験のための光学系設計開発 II,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)
51. 笠島誠嘉: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 IX,
日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日), 九州大学伊都キャンパス.
(一般講演)

(3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. Hideki Okawa, “Latest results on the H(125) from the LHC”, Asian Linear Collider Workshop (ALCW) 2018, May 28 – June 1, 2018, Fukuoka, Japan. (招待講演)
2. Shunsuke Honda, “Highlights of top quark production measurements at ATLAS”, LISHEP2018, International School on High Energy Physics, Sept. 9 – 14, 2018, Salvador, Brazil. (招待講演)
3. S.H. Kim *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Far-Infrared Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment”, ICHEP2018, July 4–11, 2018, COEX Seoul, Korea (一般講演)
4. Y. Takeuchi, “COBAND, Cosmic Background Neutrino Decay Search”, International Symposium on Neutrino Frontiers (ISoNF2018), Jul. 16–19, 2018, ICISE center, Quy Nhon, Vietnam (招待講演)
5. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND experiment”, the 13th Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE13), Sep. 10–13, 2018, Sorrento, Italy (招待講演)
6. K. Hara, “Development of SOI monolithic pixel detector for fine measurement of space and time SOFIST”, Vertex International Workshop 2018, Oct. 22–28, 2018, Chennai, India. (招待講演)
7. K. Hara, “An overview of charge collection efficiency for ATLAS17LS”, ATLAS Upgrade Week, Nov. 12–15, CERN, Switzerland. (一般講演)
8. K. Hara, “Development of SOI monolithic pixel detector for fine measurement of space and time SOFIST”, Workshop for US-Japan Science Collaboration, Feb. 20 – Mar. 3, 2019, Fermilab, USA. (一般講演)
9. K. Hara, “Welcome and Introduction”, Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)
10. Sayaka Wada, “Timing results of HPK LGAD PD”, Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)
11. Kyoji Onaru, “Performance Evaluation of HPK Pad and Segmented LGAD Sensors”, Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices, Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)

12. Sayaka Wada, “TCAD simulation of LGAD ”,
Workshop for development and applications of fast-timing semiconductor devices,
Dec. 8, 2018, University of Tsukuba (Tokyo Campus), Japan. (一般講演)
13. Hiroki Yamauchi, “Development of Silicon-on-Insulator Monolithic Pixel Detector”,
Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019,
Tsukuba, Japan.
14. Kazuki Uchiyama, “ATLAS Pixel Detector for the HL-LHC ”,
Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019,
Tsukuba, Japan.
15. Sayaka Wada, “Low-Gain Avalanche Detector for 4D Tracking”,
Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019,
Tsukuba, Japan.
16. Kazuhiko Hara, “ATLAS Strip Detector for the HL-LHC ”,
Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019,
Tsukuba, Japan.
17. Yuji Takeuchi, “R&D of FIR quantum photo-sensors based on STJs for COBAND
”,
Tomonaga Center for the History of the Universe Workshop 2019, Feb. 5 – 6, 2019,
Tsukuba, Japan.
18. S.H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment -
Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ”,
CUP Seminar, Oct. 16, 2018, IBS/CUP, Daejeon, Korea (セミナー)

(4) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. T. Iida, K. Takemasa, “Development of Hafnium STJ for cosmic neutrino back-
ground search,”
The 15th Vienna Conference on Instrumentation(VCI2019), Feb. 19-23, 2019, Vi-
enna, Austria (ポスター)
2. A. Kasajima *et al.*, “Development of Cryogenic Charge Sensitive Amplifier for STJ
readout,”
TGSW-IWP2018, Sep. 21, 2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan. (ポスター)
3. C. Asano *et al.*, “R&D of SOI-STJ for COBAND experiment,”
TGSW-IWP2018, Sep. 21, 2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan. (ポスター)

(5) 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, 2019年2月

1. 内山和貴：HL-LHCに向けたシリコンピクセル検出器の雑音及び検出効率の研究
2. 山内大輝：大面積 SOI ピクセル検出器 INTPIX4 で構築した飛跡再構成システムの 120 GeV ビームを用いた性能評価
3. 和田 冨：4次元飛跡検出のための内部増幅機能付き半導体検出器 LGAD の基礎研究