

## 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	10名
学群4年次生	6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の崩壊探索実験 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、および宇宙線ミュオン粒子を用いた大規模建造物の透視を行っている。

当グループの教員は数理解物融合科学センター (CiRfSE) 宇宙史国際研究拠点 (2017 年 10 月に改組により宇宙史研究センター (TCHoU)) 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 29 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  $10 \text{ fb}^{-1}$  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。2017-18 年には 7 篇の原著論文が公表された。

### 【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いる。図 1 に ATLAS 実験で取得したデータ量を、年ごとに示す。Run-2 実験では、2015 年に  $3.7 \text{ fb}^{-1}$ 、2016 年に  $35.9 \text{ fb}^{-1}$  の衝突データを取得したのに引き続き、2017 年には LHC 加速器、ATLAS 検

出器ともに順調に運転し、 $46.8 \text{ fb}^{-1}$  のデータを記録した。図 1 には、2018 年についても本稿執筆中の 5 月までの状況について示されている。

2017 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ている。多くの物理解析では、2015～2016 年の 2 年間に取得した約  $36 \text{ fb}^{-1}$  のデータ<sup>1</sup> を用いて研究を行った。

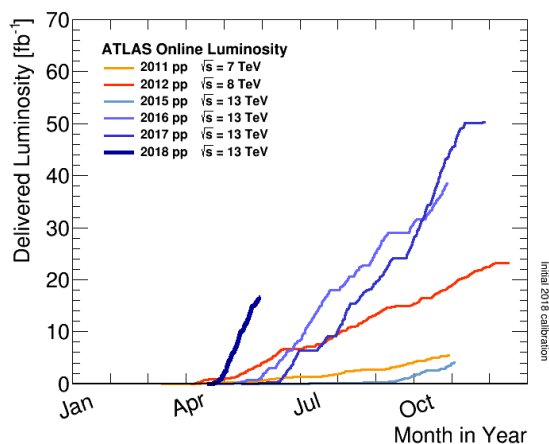


図 1: ATLAS 実験で取得したデータ量の推移を、年ごとに示している。

## (1) ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、2012 年に LHC 加速器で陽子・陽子衝突のデータを観測している ATLAS および CMS 両実験により約  $125 \text{ GeV}/c^2$  の質量をもって発見されていた。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。また、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、 $5\sigma$  を超える有意度で観測された。とくに、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  と  $H \rightarrow \gamma\gamma$  の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。2017 年にこれら 2 崩壊チャンネルを解析した質量測定結果を図 2 に示す。ヒッグス粒子の質量は  $124.97 \pm 0.28 \text{ GeV}/c^2$  と測定された。ATLAS 実験単独でのこの結果は、Run-1 データでの ATLAS, CMS 両実験の複合測定の結果  $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$  に精度の上で迫っている。

これら Run-1 で確立した解析チャンネルは、Run-2 では事象数が大幅に増え、ヒッグス粒子の生成、崩壊過程の詳細な研究に用いられはじめるようになった。2017 年度には  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  チャンネルではヒッグス粒子の生成および崩壊過程の詳細な研究結果が論文になった。ヒッグス粒子の生成断面積と  $H \rightarrow ZZ^*$  崩壊分岐比の積が標準理論予言値が  $1.34 \pm 0.09 \text{ pb}$  のところ、 $1.73^{+0.24}_{-0.23}(\text{stat.})^{+0.10}_{-0.08}(\text{exp.}) \pm 0.04(\text{th.}) \text{ pb}$  と測定されたほか、図 3 に示すように、Run-1 では全解析チャンネルを複合することで行っていたヒッグス粒子の結合に関するフィッ

<sup>1</sup> 上記の記録された全データ量は 2 年間で  $39.6 \text{ fb}^{-1}$  だが、検出器に不具合がある中で取得したデータは物理解析には用いない。こうした検出器の運転状況の影響の重大性は解析ごとに異なるため、同じ 2 年間のデータであっても使用したデータ量は、解析ごとに多少異なる。

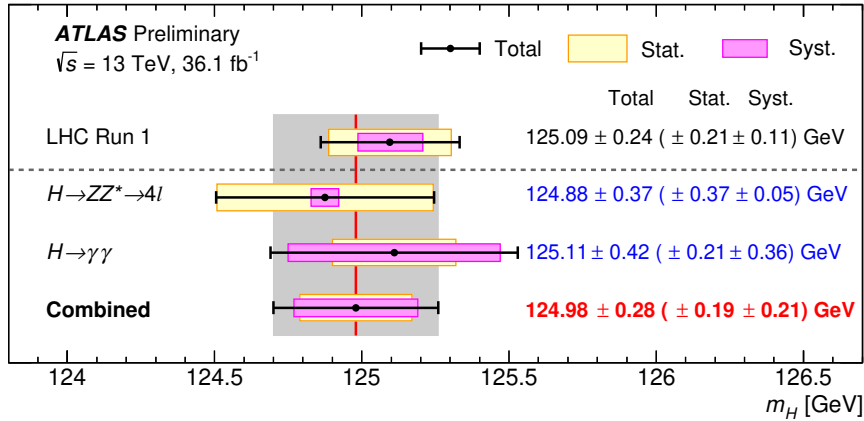


図 2: ATLAS 実験でのヒッグス粒子の質量測定結果。  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  と  $H \rightarrow \gamma\gamma$  の 2 チャンネルを合わせて測定しているが、同時に各チャンネルの単独の結果はお互いによく一致している。

トが単独チャンネルのデータだけで行われた。2018 年度には、  $H \rightarrow \gamma\gamma$  崩壊での同様な解析結果やヒッグス粒子事象の微分断面積も論文発表される予定である。

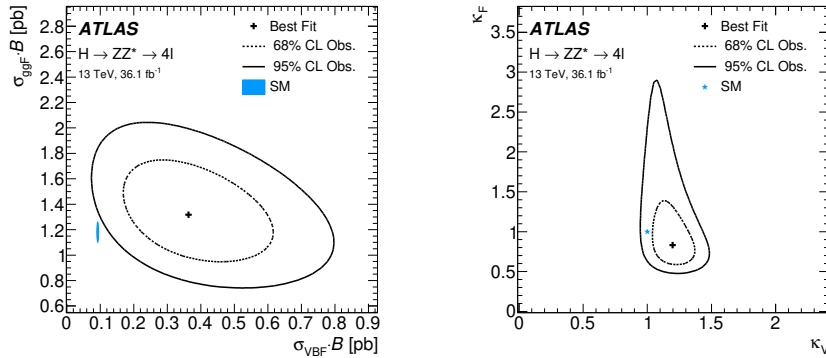


図 3:  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  事象の解析結果から得られた  $ggF$  と  $VBF$  生成過程の生成断面積と  $H \rightarrow ZZ$  崩壊分岐比の積  $\sigma_{ggF} \cdot B$  と  $\sigma_{VBF} \cdot B$  (左), およびヒッグス粒子のベクトル・ボソンとフェルミオンに対する結合の強さの測定結果を標準理論予言値で規格化した値  $\kappa_V$  と  $\kappa_F$  (右) に対する制約。

## (2) ヒッグス粒子のクォーク対への崩壊モードの観測

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  $5\sigma$  を超える有意度で観測され、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 Run-2 データの解析において  $3.5\sigma$  の有意度で信号の兆候を観測した。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4に示す。

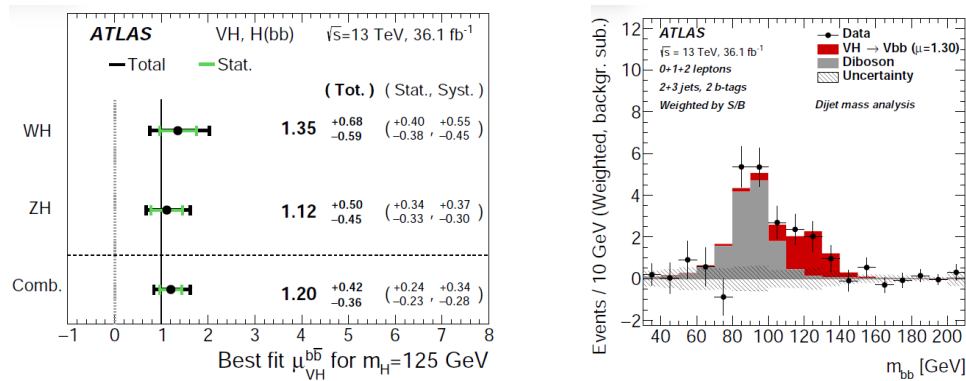


図 4: (左)  $WH$  および  $ZH$  過程の生成断面積の測定結果。(右) 事象内の2つのボトムクォークの不変質量の分布。電弱相互作用で生成される  $WZ$  と  $ZZ$  バックグラウンド事象以外のバックグラウンドの寄与は差し引いた後の分布であり、灰色の部分がバックグラウンド。ヒッグス粒子の信号のベストフィットを赤いヒストグラムで表している。

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、ATLAS 実験ではこのトップクォーク対を伴ったヒッグス粒子生成過程の発見を目指してきた。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、 $4.3\sigma$  の有意度で信号の兆候を観測することができた。モンテ・カルロ事象を使った解析感度の予想では  $3.8\sigma$  の有意度が予想されていた。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5に示す。

### (3) ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

ヒッグス粒子の稀崩壊事象の探索は、湯川結合と標準理論の検証を行う上で、極めて重要である。標準理論を超える物理が存在した場合に、既存の崩壊モードの比率が増大したり、標準理論では存在しえない崩壊モードが可能になるためである。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊は、背景事象の少ないクリーンなイベントトポロジーで測定することが可能で、第2世代粒子の湯川結合に対して、最も高い感度を持つチャンネルである。図6は、2015・2016年の全データを用いた、ベクターボソンフュージョン生成過程における、ミューオン対の不変質量分布である。昨年度の暫定的な結果を、査読付き論文に提出した。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の2.8倍以下であることがわかった。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊モードは、シグナル強度に対する不定

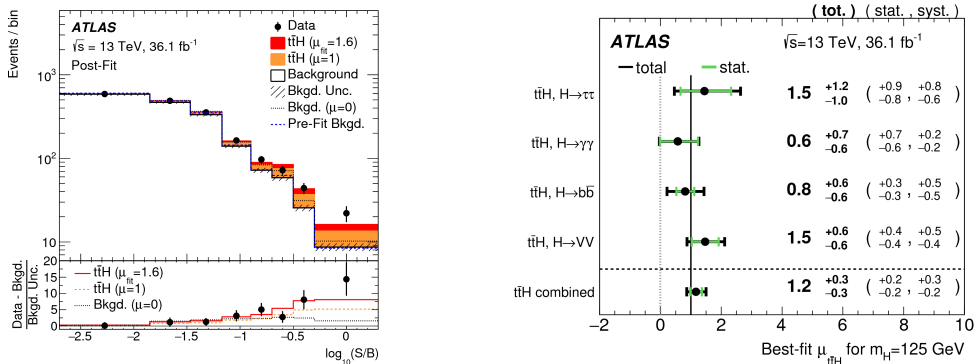


図 5: (左)  $ttH$  事象探索の各解析チャンネルで評価した事象の信号らしさを、全チャンネルまとめてプロットしたもの。ここでの信号らしさは各解析の最終段階のヒストグラムの S/B の値を使っている。(右) ヒッグス粒子の崩壊モードごとに測定した  $ttH$  生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積と標準理論の予言値の比。

性が、100%に迫っており、近いうちに、観測又は、兆候を捉えることが可能になるかもしれない。

同じく第二世代の湯川結合に起因する、チャームクォークへの崩壊に対しても探索を行った。LHC Run 1 では、 $H \rightarrow J/\psi\gamma$  チャンネルを用いて探索が行われたが、Run 2 では、新たにチャームクォーク由来のジェットを同定する、 $c$ -tagging が開発され、LHC で初めて  $H \rightarrow cc$  チャンネルの探索が行われた (図 6(右))。標準理論の予測値通りであれば、LHC で  $H \rightarrow cc$  を測定することは極めて困難であるが、新物理が存在すれば、その崩壊比が大きくなる可能性があるため、その探索は大変に重要である。ヒッグス粒子のチャームクォーク対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の 110 倍以下であることがわかった。

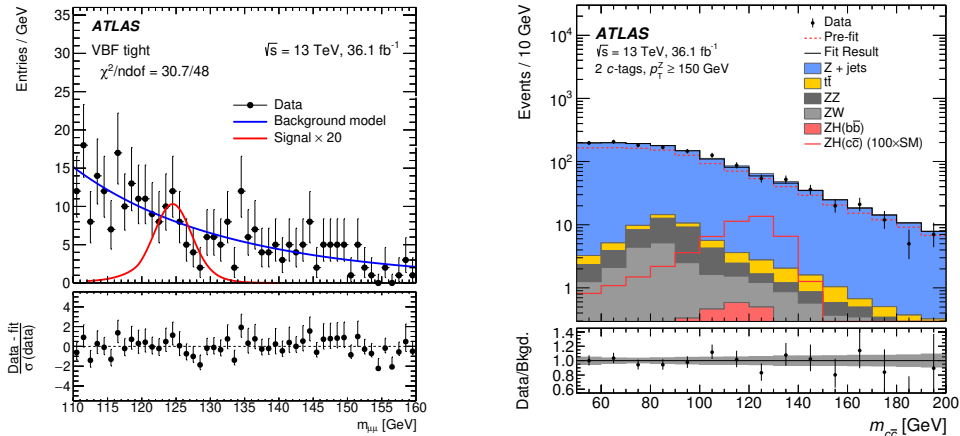


図 6: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、ヒッグス粒子の (左) ミューオン対崩壊事象および (右) チャームクォーク対崩壊事象の探索。

標準理論では存在しない (又は、ほぼ無視しうる) 崩壊モードとして、非可視 (インビジブル) 崩壊や、未知のボソンを介した崩壊、フレーバー対称性が破れた崩壊などが挙げられる。

ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索は、暗黒物質とヒッグス粒子の全崩壊幅の観点から非常に重要な研究である。暗黒物質が、ヒッグス粒子のみと相互作用するという、ヒッグスポータル暗黒物質モデルは、数多くある暗黒物質モデルの中でも最有力で、繰り込み可能

であり、又、現在の暗黒物質の直接探索実験の結果とも整合する。

2015年と2016年のRun-2の全データを用いて、ヒッグス粒子のZ/Wボソン随伴生成過程を用いた探索を行った。Zボソン随伴生成過程については、Zボソンのレプトン崩壊とハドロン崩壊の両者について考慮した。Wボソン随伴生成過程については、ハドロン崩壊のみを考えて、探索を行った。ニュートリノや暗黒物質などの、弱い相互作用をする粒子の横運動量の間接測定である、消失横運動量 ( $E_T^{\text{miss}}$ ) 分布において、標準理論予測からの若干の超過は見られたが、現時点では有意ではない (図7)。非可視崩壊比への制限は、95%の信頼度で、Zボソンのレプトン崩壊を用いたチャンネル (図7(左)) で、67% (期待感度39%) 以下であり、Z/Wボソンのハドロン崩壊を用いたチャンネル (図7(右)) では、83% (期待感度58%) であった。どちらのチャンネルでも、Run-1での期待感度を超えるに至った。最もシグナル感度が高いvector boson fusion (VBF) 過程を用いた探索は、現在進行中である。

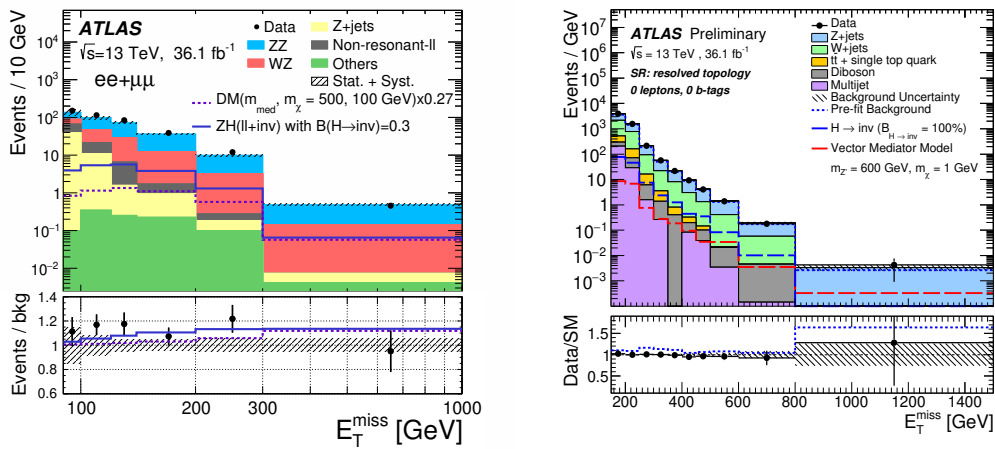


図7: ATLAS 実験のRun-2のデータを用いた、Zボソン随伴生成過程でのレプトン崩壊事象 (左)、およびZ/Wボソン随伴生成過程でのハドロン崩壊事象 (右) における、ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索での消失横運動量分布。

#### (4) 標準理論を超えた重いヒッグス粒子の探索

標準理論を超えた物理の多くのモデルにおいて、複数のヒッグス粒子が存在することが示唆されている。その中でも、ZZモードへの崩壊は、多くのモデルで予測されるため、探索チャンネルとして重要である。2015年と2016年のRun-2の全データを用いて、ZZ共鳴事象の探索を行った。その際には、Zボソンの崩壊モードに対応して、 $4l$ ,  $ll\nu\nu$ ,  $llqq$ ,  $\nu\nu qq$ ,  $4q$  ( $l$ : 電子又はミューオン,  $\nu$ : ニュートリノ,  $q$ : クォーク) というように多様なチャンネルについて、探索を行った。 $4l$  では、不変質量が250 GeVと700 GeV付近で、 $3\sigma$ を超える超過が観測されたが (図8)、 $ll\nu\nu$  チャンネルでは整合する超過は見られなかった。両チャンネルを合わせた結果、現時点で、質量域200 GeVから2.0 TeVにかけて、標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった (図8)。 $ll\nu\nu$  チャンネルでは、bulk Randall-Sundrum Graviton について、 $\kappa/M_{\text{Pl}} = 1.0$  の条件下で、1.3 TeVの質量域を、95%の信頼度で棄却し、昨年度を超える結果を得た。

$llqq$ ,  $\nu\nu qq$ ,  $4q$  チャンネルは、ZZだけでなく、WZやWW (後者は4qチャンネルのみ) の共鳴事象にも感度がある。これらのチャンネルに加えて、 $lvqq$  チャンネルからも、 $W'$  粒



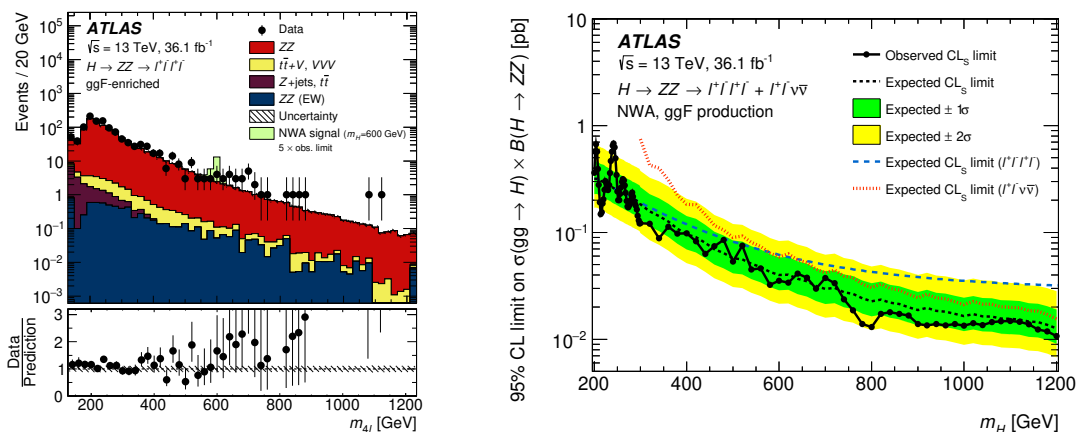


図 8:  $4l$  チャンネルにおける不変質量分布 (左) と  $4l$  と  $ll\nu\nu$  チャンネルを合わせて得られた重いヒッグス粒子の生成断面積及び崩壊分岐比への制限 (右)。

子の探索が行われ、Heavy Vector Triplet モデルにおいて、ベクターボソンとの結合  $g_V$  が 3 の場合に、3 TeV を超える質量域が 95% の信頼度で棄却された (図 9)。

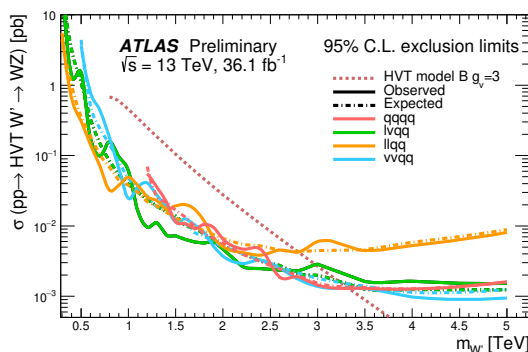


図 9:  $WZ$  共鳴事象に対する  $W'$  の質量域への制限。

## (5) 暗黒物質の探索

未発見である暗黒物質は、LHC における衝突で生成される可能性があり、現在に至るまで様々な新物理のシナリオを考慮した広範な探索が行われている。

暗黒物質が直接対生成されるシナリオでは、initial state radiation を伴った事象で、モデル依存性の少ない Simplified Models を用いた探索および解釈が行われてきた。このモデルは、媒介粒子と暗黒物質の質量、および 3 つの結合定数という、高々計 5 つのパラメータで記述される。この仮定のもとでは、興味深いことに、dijet 事象からも暗黒物質の存在可能領域に対して、強力な制限をつけることができる (図 10(左))。又、よりモデル依存性が生じるものの、ヒッグス粒子と未知の媒介粒子の相互作用を評価できる、mono-Higgs チャンネルについても探索を行った。この探索は、暗黒物質に対してヒッグス粒子が反跳するような

事象の発見を目指している。最もシグナルへの感度が優れているのは、mono- $H(\rightarrow bb)$  チャンネルである。現時点では、標準理論からの有意な逸脱はなく、 $Z'$ -2HDM と呼ばれるモデルでの二つの媒介粒子の質量域に対して、強い制限を与えた(図 10(右))

この他にも、超対称性理論などのシナリオにおいても、暗黒物質の探索が精力的に行われている。

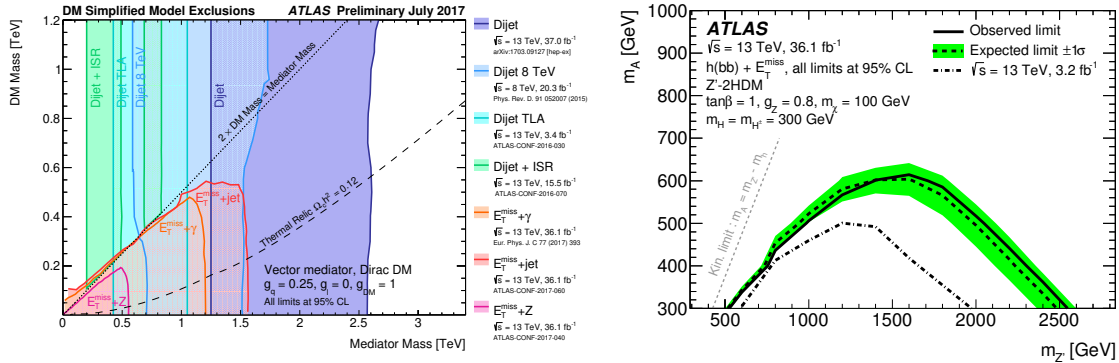


図 10: Simplified models における媒介粒子と暗黒物質の質量域に対する制限(左)と、 $Z'$ -2HDM モデルに対する mono- $H(\rightarrow bb)$  チャンネルから得られた棄却域(右)。

### [3] HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

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  $3000 \text{ fb}^{-1}$  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  $50 \times 50 \mu\text{m}$  (または  $25 \times 100 \mu\text{m}$ ) 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。

我々は、HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極、p 型基板を用いたセンサー ( $n^+$ -on-p) を提案し、実際に陽子線や中性子を照射し、HL-LHC の高放射線線量でも使用可能な検出器を設計をしてきた。p 型基板を用いることは高速な電子を収集することで収集電荷量の放射線による劣化を受けにくく、また、従来から放射線耐性に優れるとされた  $n^+$ -on-n 型設計に比べ、 $n^+$ -on-p の設計では片面プロセスが可能であるため製造コストが低減でき、よりも広い領域を半導体検出器で覆う HL-LHC 用には特に有利であることを示してきた。

2017 年度は、エンドキャップ部に用いるストリップ型センサー設計の最終評価、 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  サイズのピクセルセンサーとピクセルモジュールを試作し評価を行った。

#### (1) ストリップ型センサー

2016 年に、ストリップ型センサーの実機を評価したところ、一部に暗電流の不安定性があることが確認された。その原因が湿度によるものであることを特定し、2017 年度には表



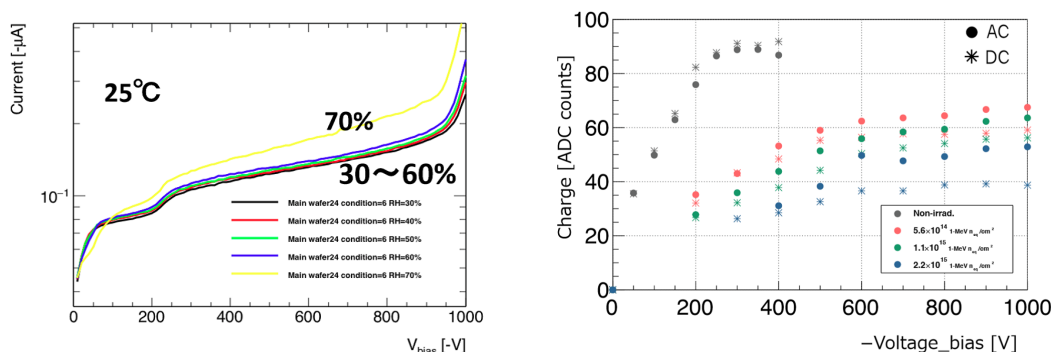


図 11: (左) 成膜法を改良した実寸センサーサンプルの暗電流を湿度を変えて測定した。湿度依存性がないことを示した。(右) 陽子線照射したサンプルと未照射サンプルの電荷収集量の比較。

面保護膜の生成法に改善を加えることで、図 11 (左) に見られるように湿度依存性がないサンプルの製造に成功した。当面は新生成法で試作をすすめ、統計的な評価を進める。

エンドキャップ用の最初の実機 (R0) を試作し、東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームにより照射し、その評価を行った。図 11 (右) は電荷収集量の放射線による劣化の様子を示す。実際に用いる AC 結合のサンプルは 500 V のバイアス電圧で未照射からの劣化は 50% に抑えられ、十分に仕様を満たすことを示した。この結果は国際学会で発表された。同時に DC 結合のサンプルを初めて評価した。暗電流の増加により読出しアンプの特性が影響を受け、電荷収集量は AC サンプルに比べやや悪い結果となったが、その他の電氣的性能は予想通り優れた結果が得られた。暗電流の影響を受けにくいアンプ設計の改善により、今後は、より安価な DC 結合ストリップが大面積シリコンセンサーとして使用できる可能性を示した。

## (2) 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。

ピクセル検出器は現行の ATLAS 読み出しチップである FE-I4 の仕様 (ピクセルサイズ  $50 \times 250 \mu\text{m}$ ) のため、2016 年度までは、ピクセルサイズを非対称にして部分的に  $50 \times 50 \mu\text{m}$  を実現して評価してきた。2017 年度は新しく開発された FE65 読み出しチップを用いて  $50 \times 50 \mu\text{m}$  および  $25 \times 100 \mu\text{m}$  のセンサーを試作しビーム試験評価をした。同時に、ATLAS への実装を念頭に、フレックス基板を用いたモジュール化 (図 12 左) も進めた。ピクセル設計に関しては、各ピクセルに配線するバイアス抵抗の経路に依存して検出効率が陽子線照射後に低下することが分かっているが、面積が小さなピクセルではその効果が相対的に顕著となる。そこで、劣化が少ないように経路を最適化した。図 12 右は、 $25 \times 100 \mu\text{m}$  ピクセル電極内の検出効率を位置依存性として示すもの (陽子線照射後) である。バイアス構造をもたないものはピクセル間での低下は見られない。バイアス構造のあるものは、劣化があるがバイアス電圧を上げることで劣化は低減できる。これはピクセル境界での電場低下に収集電荷量の劣化が起因する事を示唆する。

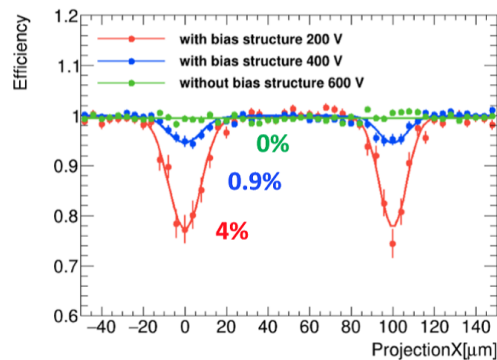
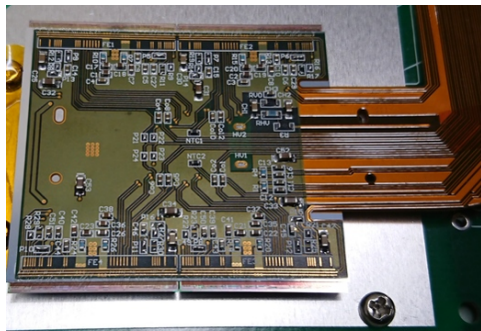


図 12: (左) パレル部への実装を想定した、フレックス基板によるピクセルセンサーモジュール。(右)  $3 \times 10^{15}$   $n/cm^2$  を照射した  $25 \times 100 \mu m$  ピクセルセンサーのピクセル内位置での検出効率の場所依存性。バイアス構造のないものに比較して、2つの逆バイアス電圧設定に対する構造ありの場合の分布。

読出し ASIC にバンプボンドをすれば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。主導して進めてきた検出効率低下が小さくバイアス構造を有するピクセルセンサーの提案の意義は高い。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、そもそも ASIC の閾値設定は妥当なのかなどの評価を継続して進めている。

#### [4] LGAD 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。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が可能であると考えている。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。

2016 年度に浜松ホトニクスで試験用 LGAD ピクセルを試作し、ガンマ線、中性子線、陽子線を照射し LGAD の機能がどう保たれるかの評価を行った。2017 年度には、電極を細分化したセンサーについての応答の一様性をレーザーを用いて評価した (図 13 左)。この研究により不感領域の振舞いを定量的に評価でき、一定のゲインを確保しつつ細分化する設計を探るための最初のデータを得ることができた。時間分解能に対する評価は FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いて行った。ビームラインには 3 つの LGAD センサーを並べ、信号は DRS4 ASIC による 5 GHz の FADC で読み出した。3 つのうち任意の 2 つの時間差の分布から、個別の LGAD の時間分解能を評価した。図 13 右には、一例として 2 つの LGAD 間の時間差分布を示す。このような分布から評価できる時間分解能を、時間測定の閾値電圧と信号ピーク電圧の比  $f$  の関数としてまとめた。室温でも 35 ps, 8 °C では 30 ps を切る優れた分解能を得た。

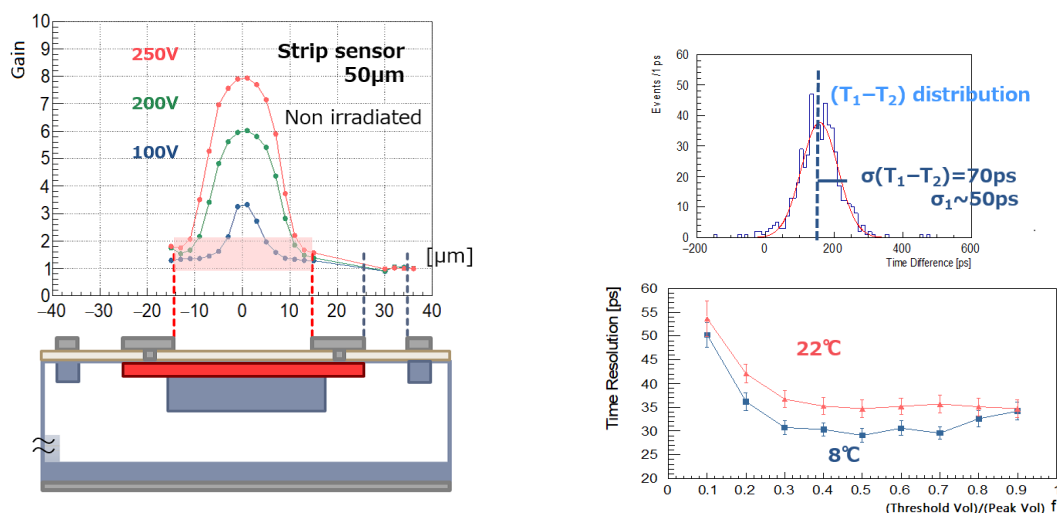


図 13: (左) 赤外レーザーを用いたストリップ型 LGAD の場所によるゲインの変化の測定結果。(右) 2 つの LGAD の時間差分布 (上に例を示す) から、閾値電圧の関数として達成した時間分解能を示す。

## 【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。

SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく高速応答が期待できるが、一方、正孔を酸化膜に蓄積しやすく、電離性放射線線量 (TID) が増えると蓄積正電荷の影響を受けて近傍のトランジスタ特性が大きく変化することを明らかにしてきた。そこで SOI の素粒子実験への適用を可能にするため、埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 層 SOI 基板を世界で初めて製作し、評価を継続している。粒子センサー基板の上に 2 層の埋め込み酸化膜層を形成し、その中間シリコン層 (SOI2) に TID 損傷による劣化に応じて負の電荷を加えることで TID 損傷を補償することを目指している。

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導して進め、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。SOI 素子は当初は数  $\text{kGy}$  で全く使い物にならなくなったが、この研究により TID に対して通常の CMOS 素子と同等の放射線耐性がある素子が作製できる事を示し、さらに優れた SEE 耐性を考慮すると、SOI は素粒子実験に極めて適した素子であるといえる。10 年におよぶ開発の経緯をまとめ国際学会で発表した。また、ピクセルサイズ  $8\ \mu\text{m}$  の FPIX2 で昨年度に達成した、世界で初めて半導体検出器で  $1\ \mu\text{m}$  切る成果は、解析方法を改良し、最終的に  $0.65\ \mu\text{m}$  を得た。国際学会で発表し、大きな反響を受けた。

2017 年度は FPIX の有感面積を 4 倍に広げ、並列読み出し経路数を 2 倍の 16 ラインに改良した FPIX4 と読み出し用のサブボードを設計・製作した。これらと並行して、FPIX3 を用いた高位置分解能中性子検出のための基礎評価、ILC 用 SOFIST の FNAL でのテストビー

ム評価を実施した。

## (1) 高位置精度中性子検出のための基礎研究

中性子の位置を精度よく求めることは中性子を用いた重力の検証実験やウラン濃縮度の検定などの実用面でも重要であり、従来は特殊なプラスチックにつく傷をエッチングで広げることで $1\mu\text{m}$ 程度の精度を実現している。FPIXの裏面にB成膜をして、中性子との反応で発生する $\alpha$ 粒子を検出することで時間情報をもった高精度位置測定ができる可能性がある。図14に示す様にセンサーを $75\mu\text{m}$ 厚に薄化し、裏面から $^{241}\text{Am}$ 線源からの $\alpha$ 線を入射した。センサー直前にはシリコンの破断面をエッジとした $\alpha$ 線の遮へい材を設置し、測定するエッジ位置の広がりから位置分解能を評価した。図に示す様に、エッジの広がりから位置分解能は $3.9\pm 0.2\mu\text{m}$ と評価できた。この値には $\alpha$ 線が角度を持って入射する効果、エッジ部での散乱、シリコン遮へい材が一直線でない効果も含まれるので、こうした影響を排除した評価が今後必要となる。

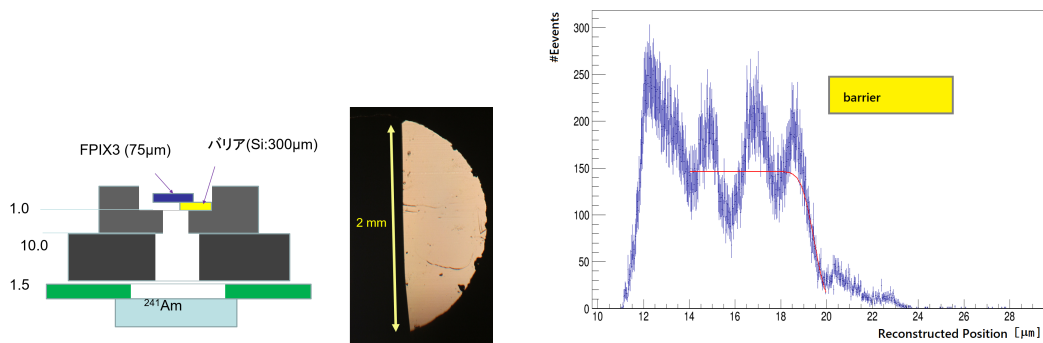


図 14: FPIX による中性子位置測定精度の評価のために $\alpha$ 線源の遮へい効果を測定した。(左) 測定セットアップ, (右)  $\alpha$ 線測定数の位置依存性。電荷重心法で求める位置は収集電荷量がピクセル内で不均一であることから周期的な影響を受ける。この効果の評価することで位置分解能はさらに向上する。

## (2) ILC 用 SOFIST のビーム試験

優れた時間分解能と位置分解能を同時に達成できるピクセル検出器を、国際リニア衝突器実験 ILC への応用を目指して開発している。位置情報は従来の電荷積分型増幅器で行うと同時に、電圧を一定割合でランプし、ビーム通過時のランプ電圧を測定することで時間情報を得ることを目指している。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  $70\mu\text{m}$ ) を用いて評価した。FNAL でのビーム試験では SOFISTv2 を 3 台、飛跡再構成用に大面積の INTPIX4 を 4 台配置し、 $120\text{GeV}$  陽子を通過させた。図 15 左はセットアップの様子と INTPIX4 サイズの情報を示す。右は、2 つの SOFIST 間の時間測定の相関を示す。ビームに同期して  $500\mu\text{s}$  のゲートを開き、その間の信号の通過時間を測定しているので、複数粒子の通過では  $y=x$  の相関以外の組合せが発生するが、データに示す様に明らかな相関が得られた。この相関の時間差分布から暫定的に  $4.5\mu\text{s}$  の時間分解能を得た。個別のピクセルの時間応答校正を施すことでさらに改善が期待できる。ILC では  $0.55\mu\text{s}$  のバンチで衝突が起きるため、最終目標はバン



ちを区別できる分解能であるが、1 ms のトレイン間に起きる衝突事象に時間情報を加えられる技術の可能性を示すことができた意義は高い。

INTPIX4 のピクセルサイズ (17 $\mu\text{m}$  角) と有感面積の大きさは世界的にも有数である (他には欧州の EUDET18.4 $\mu\text{m}$  角が匹敵)。大面積の INTPIX4 をビームライン飛跡検出器として稼働させることも意義が高い。用いたシステムでの飛跡再構成の性能は現在評価中である。

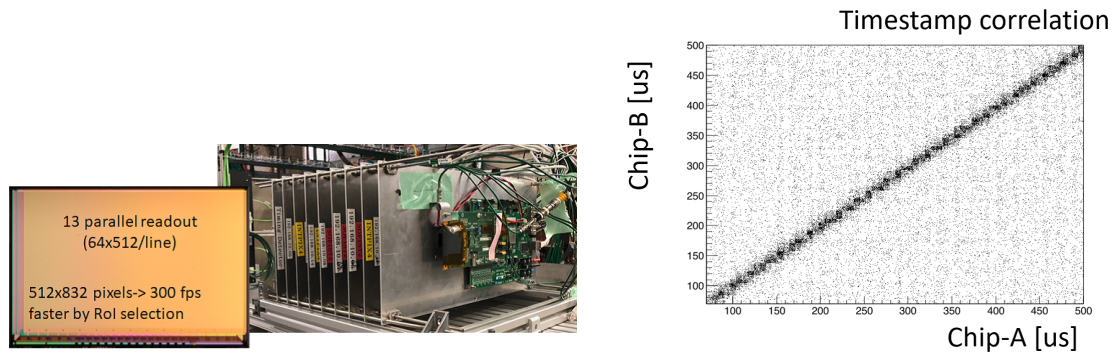


図 15: (左) FNAL でのビーム試験セットアップの配置と飛跡再構成に用いた INTPIX4 のセンサー部。INTPIX4 を 4 台, SOFIST3 台に 120GeV 陽子を通過させた。(右) 2 つの SOFIST で測定された時間相関分布,

## 【6】 COBAND 実験

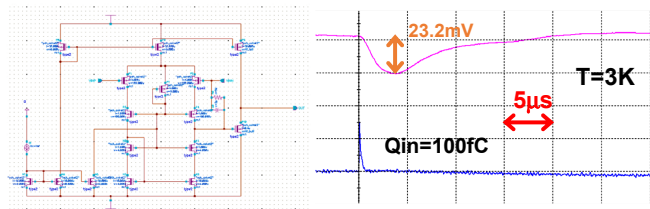


図 16: STJ 信号増幅のために開発したテレスコピックカスケード差動増幅回路をもつ低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温アンプ試作回路 (左)。3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力 (約 100fC) に対して時定数 10  $\mu\text{m}$  程度, 波高 23.3 mV の出力を得た (右)。

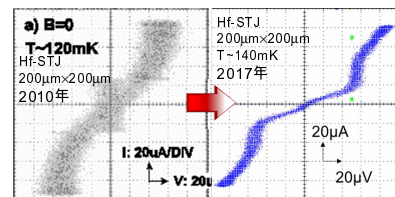


図 17: ハフニウム (Hf) を用いた超伝導トンネル接合素子の I-V カーブ。左は, 2010 年に初めて Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf の構造をもつ素子によって, ジョセフソン電流を観測した。右は, 2017 年に作製された素子。Hf 成膜条件および酸化膜作製条件の最適化により, リーク電流が改善が見られる。

COBAND 実験は, 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索を目的とした, 筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同実験である。宇宙初期に生成されたニュートリノの名残とされる宇宙背景ニュートリノは, 現在温度 1.9 K, 各質量固有状態の世代ごとに数密度 110 個/cm<sup>3</sup> で宇宙全体にわたって存在していると予想されている。最も重い質量固有状態のニュートリノは, 軽い質量固有状態に波長約 50  $\mu\text{m}$  の光子を放出して崩壊することが可能であり, 我々 COBAND 実験では, 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<sup>12</sup> 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。実験に要求される光検出器は, 波長 50  $\mu\text{m}$  (エネルギー 25 meV) の光子をエネルギー分解能 2% 以下の精度で一光子ずつ測定可能な性能である。我々のグループでは, 観測ロケット実験で使用予定のニオブ (超伝導ギャップエネルギー  $\Delta = 1.55$  meV,  $T_c = 9.23$  K) とアルミニウム

$\Delta = 0.172 \text{ meV}$ ,  $T_c = 1.20 \text{ K}$ ) 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。

Nb/Al-STJ 単体では、 $25 \text{ meV}$  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。我々のグループでは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いる。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素子は、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および測定を行い、 $300 \sim 400 \text{ mK}$  の極低温での動作を確認、並びに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。昨年度は、STJ のパルス光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮したより実際的な低入力インピーダンス増幅回路の試作および評価を行った。テレスコピックカスコード差動増幅に容量および抵抗の負帰還回路をつけることにより低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温増幅器 (図 16 左) を試作し、冷凍機内の 3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力 (約  $100 \text{ fC}$ ) に対して時定数  $10 \mu\text{m}$  程度、波高  $23.3 \text{ mV}$  の出力を得た (図 16 右)。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は、昨年度着任した飯田助教が福井大、関西学院大等との共同研究により開始した。

Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK, 理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確立し、2010 年度には、Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf による SIS 構造の作製に成功してジョセフソン電流を確認した (図 17 左)。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの可視域連続光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認した。昨年度の成果としては、Hf 成膜の際、応力が最小になる条件ではなく表面粗さが小さくなる成膜条件 (表面粗さ  $\text{RMS} = 2.5 \text{ nm}$ ) を使用して Hf-STJ を作製し漏れ電流密度を従来の値から大幅な改善に成功し、温度  $T = 140 \text{ mK}$ ,  $200 \mu\text{m}$  角の Hf-STJ において漏れ電流  $6 \mu\text{A} @ V = 40 \mu\text{V}$  を達成した。今後、より接合面積の小さい素子の作製、漏れ電流の要因となり得る地磁気等の影響の排除、およびより低温での漏れ電流の測定による正確な漏れ電流の測定を行い漏れ電流改善に繋げることが重要なステップとなる。また、可視パルス光入射に対するパルス応答の詳細な測定も重要である。

## 【7】 $^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノは物質の根源を司る素粒子の一種である。2002 年と 2015 年のノーベル物理学賞がニュートリノ研究に授与されるなど、ニュートリノ物理学は近年目覚ましい発展を遂げている。ニュートリノ研究に残された次なる課題は、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 (図 18)。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）。

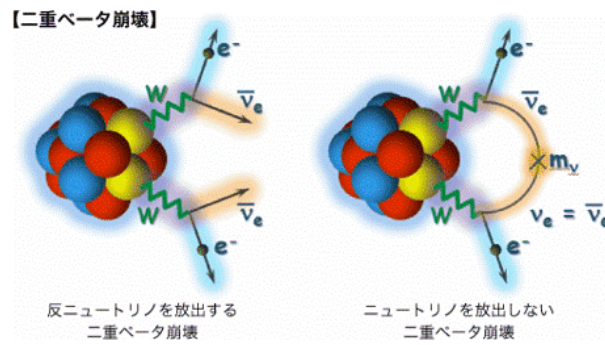


図 18: 二重ベータ崩壊の概念図

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、 $^{48}\text{Ca}$  の二重ベータ崩壊の研究を推進している。 $^{48}\text{Ca}$  は Q 値が 4,270 keV 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  $\text{CaF}_2$  シンチレータ結晶を  $2\text{ m}^3$  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 19）を作り、将来計画に向けたスタディを行っている。CANDLES 実験では  $\text{CaF}_2$  と液体シンチレータの時定数の違いを利用した波形弁別によって 2 桁以上のバックグラウンド低減を実現している。

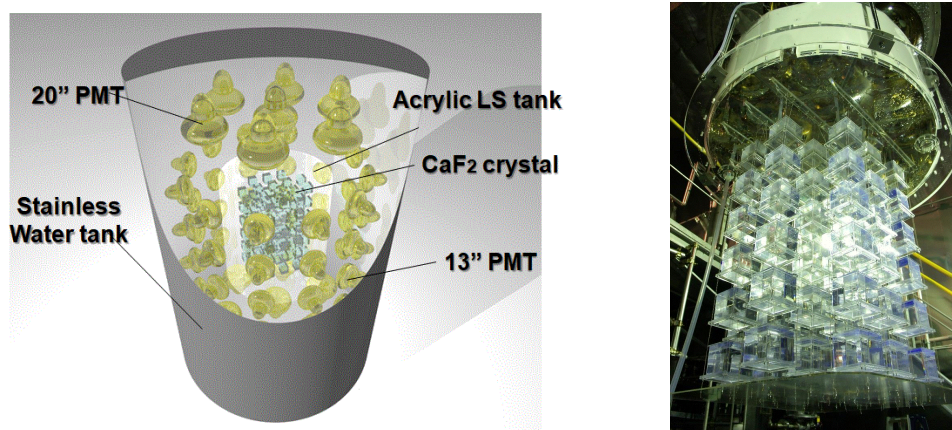


図 19: CANDLES 実験の概略図（左）と  $\text{CaF}_2$  結晶の写真（右）

2016 年には実験室の環境中性子に起因するバックグラウンドを低減するため、鉛によるガンマ線遮蔽体、ホウ素入りゴムシートによる中性子遮蔽体が装置に導入された。それによ

りさらに二桁近くバックグラウンドが減少し、現在順調にデータを取得中である。2017年度は前年度から取得した131日間のデータを用いて  $0\nu\beta\beta$  探索を行った。バックグラウンド除去のカットをかけた時のエネルギースペクトルを図20に示す。左が全結晶の場合、右が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。高純度結晶を選んだ場合、すべてのカットかけた後、Q値領域(4,170 - 4,480 keV)で残ったのは0事象であった。この結果から  $^{48}\text{Ca}$  の2重ベータ崩壊に対する半減期の下限値を求めたところ、 $T_{1/2} > 6.2 \times 10^{22}$  年 という値が得られた。これは  $^{48}\text{Ca}$  に対して、これまでで世界最高感度下限値となっている。

今後は引き続きデータを取得し統計をためていくとともに、バックグラウンドや系統誤差の見積もりをより高精度に行っていく。また並行して、同位体濃縮による  $^{48}\text{Ca}$  の濃度向上など、将来のためのR&Dも進める予定である。

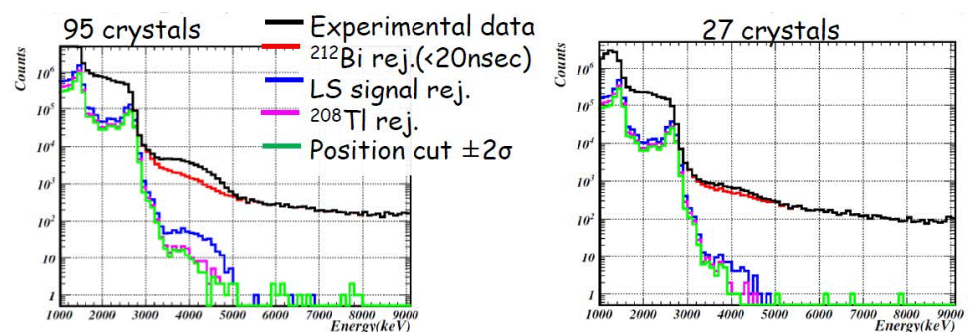


図 20: CANDLES 実験で得られたエネルギースペクトル。左が全結晶、右が不純物  $10\ \mu\text{Bq}$  以下の綺麗な結晶を選んだ場合。各カットステップごとに載せているが、緑色の線が全てのカットをかけた後のスペクトルである。

## [8] 新規大発光量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、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 ( $\text{CaI}_2$ ) 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  $\text{NaI(Tl)}$  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  $\text{CaI}_2$  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。

2016年度から2017年度にかけて二重ベータ崩壊核の  $^{48}\text{Ca}$  を含むアルカリハライド結晶である  $\text{CaI}_2, \text{CaBr}_2, \text{CaCl}_2$  の開発を行った。結晶作成には図21左に示すようなブリッジマ

ン結晶育成法を用いた。各種粉末原料を調合し、9N アルゴン雰囲気下で石英アンブルに投入し、300℃でのベーキングの後、石英アンブルを封止した。実際に作った結晶の写真を図21右に示したが、3種類すべてにおいて無色透明な結晶が得られた。作製した結晶は、湿度1%以下のドライルーム中での切断、研磨の後、発光、シンチレータ特性評価を行った。

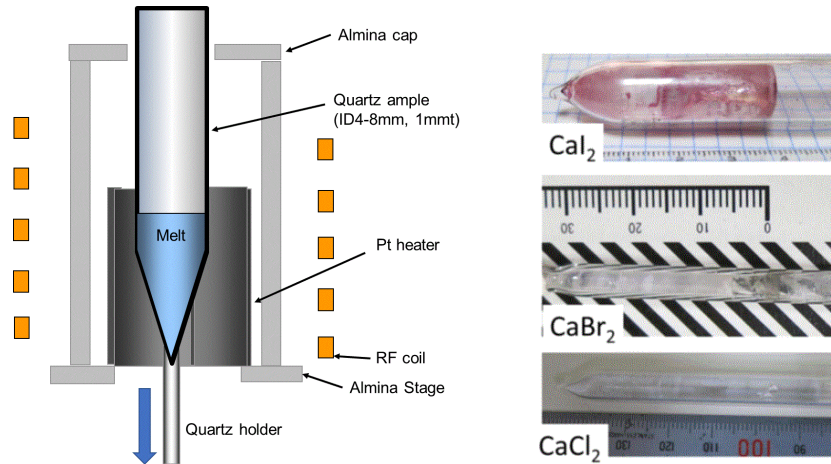


図 21: CaI<sub>2</sub> 結晶を作成するのに用いたブリッジマン育成炉の概念図 (左) と、作成した CaI<sub>2</sub> 結晶、CaBr<sub>2</sub> 結晶、CaCl<sub>2</sub> 結晶の写真 (右)。

3種類の結晶のうち、CaI<sub>2</sub> で NaI(Tl) の 2.7 倍、CaF<sub>2</sub> と比べると約 10 倍となる 107,000 photon/MeV の大発光量が確認された (図 22)。発光波長は 410 nm と光電子増倍管の感度波長と一致しており、発光の時定数は 834 ns であった。総合的に見て非常に良い性能のシンチレータであることが分かった。

しかしながら CaI<sub>2</sub> 結晶は、劈開性が極めて強く加工や取り扱いが困難であることが判明した。そこで我々は、CaI<sub>2</sub> のヨウ素 (I) を一部臭素 (Br) で置き換えた、Ca(Br,I)<sub>2</sub> 結晶の開発も並行して進めることにした。石英封止型ブリッジマン法を用い作製した Eu 添加 Ca(Br, I)<sub>2</sub> 結晶を図 22 右に示す。作成した 3 種類のうち、Eu2%:CaBr<sub>0.5</sub>I<sub>1.5</sub>、Eu2%:CaBrI の組成について透明性を有する結晶が得られた。全てにおいて劈開性は改善が見られたが、発光量特性などに関しては現在測定を進めているところである。今後は Br の割合を最適化することで、大発光量でかつ加工性に優れた結晶を開発していく。

## 【9】 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た。設計には、SSC 実験用に開発した波長変換ファイバーによるプラスチックシンチレータバーの読み出し、ILC 実験用に開発中の MPPC 光検出器、SOI で培った FPGA ベースの読み出しシステムを応用した。試作機での評価を経て、2015 年には国際廃炉機構 (IRID) の支援を受けて福島第一原発 1 号機、2016-17 年度は東京電力の事業委託を受けた KEK に協力する体制で 2-3 号機の観測をした。



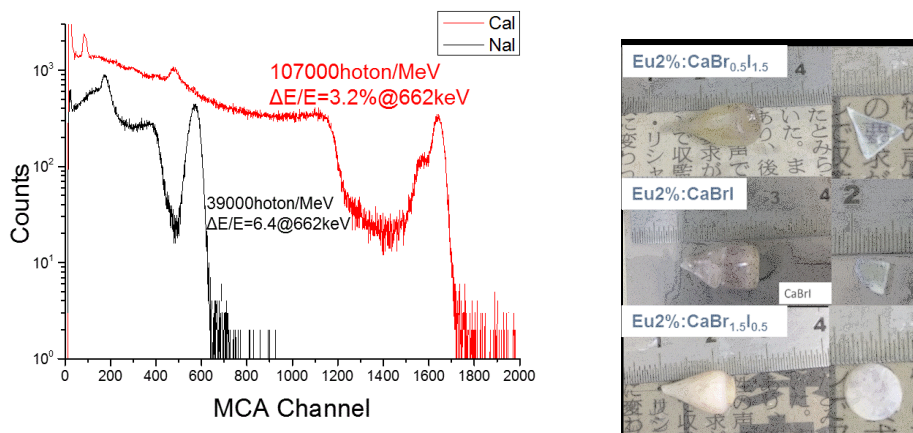


図 22: CaI<sub>2</sub> 結晶に <sup>137</sup>Cs の 662 keV ガンマ線を当てた時の発光量分布 (左)。赤が CaI<sub>2</sub>、黒が NaI(Tl) であり、ピークの位置から 2.7 倍の発光量であることが確認された。CaI<sub>2</sub> の光電ピークの左にある小さいピークは特性 X 線のエスケープピークである。右は作成した Ca(Br,I)<sub>2</sub> 結晶各種。Br の割合によって異なる性質が得られた。

1 号機の観測からは燃料デブリは燃料装荷位置にはほとんどないことが分かったが、測定装置を建屋からやや離れた位置に設置する必要があったため、圧力容器の下部は視野に入らず、デブリの存在に対する情報は得られなかった。

1 号機での経験から測定器を小型化し、2 号機の観測では建屋に接するように設置し、3 号機ではタービン建屋内に設置し、ともに圧力容器全体の様子を観測することを可能とした。観測結果から、2、3 号機ともに燃料装荷位置にはほとんど燃料デブリはないことが判明した。2 号機では圧力容器の底部に過剰な吸収があり、背景となる原子炉の構造体を定量的に評価した結果、底部に残る燃料デブリ量は溶け落ちる前の燃料集合体とほぼ等しいと推定した。また、3 号機では、圧力容器の底部にも強い吸収はなく、燃料デブリは格納容器へと解け落ちたと推定できる。

これらの観測により当初から予定していた 3 基の原子炉における評価を完遂した。最近ではカメラによる撮影が可能となっているが、圧力容器内の燃料デブリを定量的に評価できる唯一の手法としてミュオンラジオグラフィは重要な役割を果たした。筑波大チームは検出器の設計と建設を行い、データ解析でも主要な貢献を果たした。観測データの解析を進めると、水平方向のミュオン粒子の運動量分布の不定性が大きな系統誤差をあたえることが分かってきた。そこで、実際に、最大 9.5 m 長の鉄を検出器層の間に挟み、レンジを測定する装置を KEK に整備し、1 年間にわたる観測を経て、水平宇宙線ミュオン粒子の運動量分布を学術論文として発表した。図 23 には測定の設定アップと宇宙線ミュオンフラックスの主な測定結果を示す。

## 【10】 外部資金

1. 科学研究費 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」2013 – 2017 年度  
計画研究 B02: 「宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開

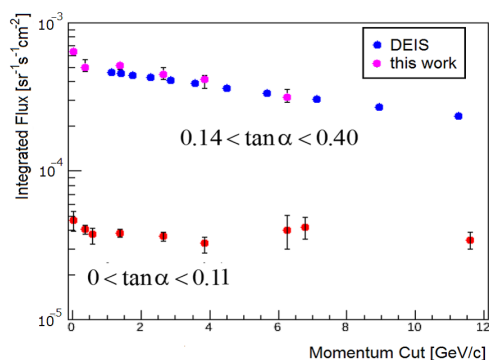
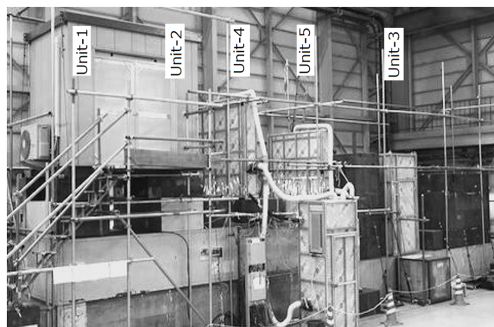


図 23: (左) 水平方向宇宙線ミュー粒子の運動量測定をするためのセットアップ。5 層の位置検出器の間に鉄ブロックをはさみ、レンジ法により運動量を求めた。(右) 宇宙線ミュー粒子のフラックス。天頂角  $75^\circ$  の領域では文献データと矛盾ない結果を得、水平方向のデータを新たに加えた。

発」, 研究代表者: 金 信弘, 研究分担者: 吉田拓生, 武内勇司

12,090 千円 (直接経費 9,300 千円, 間接経費 2,790 千円) (2017 年度)

2. 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) (2017 年度)
3. 日米科学技術協力事業 (高エネルギー物理分野) 特別枠  
日本側研究代表者: 武内 勇司  
物件費 84 千円, 派遣旅費 834 千円 (2017 年度)
4. 科学研究費 若手研究 (B) 「高発光量ヨウ化物シンチレータによる宇宙暗黒物質探索のための基礎研究」 2016 – 2017 年度, 研究代表者: 飯田崇史  
2,340 千円 (直接経費 1,800 千円, 間接経費 540 千円) (2017 年度)
5. 科学研究費 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」 公募研究「セルフトリガー可能な  $^{24}\text{Na}$  線源の開発と  $\text{CaF}_2$  検出器の低バックグラウンド化」 2016 – 2017 年度, 研究代表者: 飯田崇史  
2,990 千円 (直接経費 2,300 千円, 間接経費 690 千円) (2017 年度)
6. 東北大学金属材料研究所共同利用研究・若手萌芽研究「ヨウ化カルシウム ( $\text{CaI}_2$ ) シンチレータ結晶の開発と基礎物理への応用」 2017 年度, 研究代表者: 飯田崇史  
230 千円 (直接経費 230 千円) (2017 年度)
7. 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  
10,530 千円 (直接経費 8,100 千円, 間接経費 2,430 千円) (2017 年度)
8. 科学研究費 新学術領域研究 「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」 2013 – 2017 年度  
計画研究 C01: 「高輝度加速器実験のための素粒子イメージング」, 研究分担者: 原和

彦

1,560 千円（直接経費 1,200 千円，間接経費 360 千円）（2017 年度）

9. TIA かけはし「3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」  
2016 年度 – 継続中，連携機関代表者：原和彦  
100 千円（直接経費 100 千円）（2017 年度）
10. TIA かけはし「簡単・便利な超伝導計測—100 倍精度の計測を非専門家の手で」  
2016 年度 – 継続中，連携機関代表者：武内勇司  
100 千円（直接経費 100 千円）（2017 年度）

## 【11】 研究発表

### (1) 原著論文

1. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Observation of the  $Y(4140)$  structure in the  $J/\psi\phi$  mass spectrum in  $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$  decays,” *Mod. Phys. Lett. A* **32**, 1750139 (2017).
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of  $\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$  using  $e^+e^-$  pairs from  $\gamma^*/Z$  bosons produced in  $p\bar{p}$  collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 112016 (2016) Addendum: [*Phys. Rev. D* **95**, 119901 (2017)].
3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the  $D^+$ - Meson Production Cross Section at Low Transverse Momentum in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **95**, 092006 (2017).
4. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the inclusive-isolated prompt-photon cross section in  $p\bar{p}$  collisions using the full CDF data set,” *Phys. Rev. D* **96**, 092003 (2017).
5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *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 *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 *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**, 072003 (2013) Erratum: [*Phys. Rev. D* **97**, 099901 (2018)].



8. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 490 (2017).
9. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Trigger System in 2015,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 317 (2017).
10. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 072002 (2017).
11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 182 (2017).
12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in dijet events using  $37 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 052004 (2017).
13. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour-violating decays of the Higgs and  $Z$  bosons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 70 (2017).
14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section using  $e\mu$  events with b-tagged jets in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 136 (2016) Erratum: [*Phys. Lett. B* **772**, 879 (2017).]
15. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 195 (2017).
16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the  $H \rightarrow b\bar{b}$  decay with the ATLAS detector,” *JHEP* **1712**, 024 (2017).
17. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of algorithms that reconstruct missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions in the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 241 (2017).
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Precision measurement and interpretation of inclusive  $W^+$ ,  $W^-$  and  $Z/\gamma^*$  production cross sections with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 367 (2017).

19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of long-range azimuthal anisotropies and associated Fourier coefficients for  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  and 13 TeV and  $p$ +Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **96**, 024908 (2017).
20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in the lepton-plus-jets final state in pp collision data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 87 (2016) Erratum: [*Eur. Phys. J. C* **77**, 564 (2017).]
21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-sections of single top-quark and top-antiquark  $t$ -channel production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1704**, 086 (2017).
22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances decaying to a  $W$  or  $Z$  boson and a Higgs boson in the  $\ell^+\ell^-b\bar{b}$ ,  $\ell\nu b\bar{b}$ , and  $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$  channels with  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **765**, 32 (2017).
23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of multi-particle azimuthal correlations in  $pp$ ,  $p$ +Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 428 (2017).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC,” *Nature Phys.* **13**, 852 (2017).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}Z$  and  $t\bar{t}W$  production cross sections in multilepton final states using  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 40 (2017).
26. 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 diphoton final states using  $37 \text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collisions collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **775**, 105 (2017).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 393 (2017).
28. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the jets plus

missing transverse momentum final state at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1712**, 085 (2017).

29. 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  $Z$  boson and a photon in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **764**, 11 (2017).
30. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in final states with two leptons in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 898 (2017).
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 vector-like top quarks in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1708**, 052 (2017).
32. 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 two same-sign or three leptons and jets using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collision data with the ATLAS detector,” JHEP **1709**, 084 (2017).
33. 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 to high- $p_T$  W bosons and b quarks in the lepton-plus-jets final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1710**, 141 (2017).
34. 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  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **77**, 379 (2017).
35. 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 inclusive isolated-photon production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **770**, 473 (2017).
36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the prompt  $J/\psi$  pair production cross-section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 76 (2017).
37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to  $b$ -quarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 11 (2017).

38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial, total and differential cross-section measurements of  $t$ -channel single top-quark production in  $pp$  collisions at 8 TeV using data collected by the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 531 (2017).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top quark decays  $t \rightarrow qH$ , with  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions using the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 129 (2017).
40. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction of primary vertices at the ATLAS experiment in Run 1 protonproton collisions at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 332 (2017).
41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of forward-backward multiplicity correlations in lead-lead, proton-lead, and proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **95**, 064914 (2017).
42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in a lepton plus high jet multiplicity final state with the ATLAS experiment using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collision data,” *JHEP* **1709**, 088 (2017).
43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W boson polarisation in  $t\bar{t}$  events from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in the lepton + jets channel with ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 264 (2017).
44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1  $pp$ -collision data with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 26 (2017).
45. 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  $W$  or  $Z$  boson and a Higgs boson in the  $q\bar{q}^{(\prime)}b\bar{b}$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **774**, 494 (2017).
46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross section of a  $Z$  boson in association with jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 361 (2017).
47. 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 containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$   $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 144 (2017).

48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $W^\pm W^\pm$  vector-boson scattering and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 012007 (2017).
49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Heavy Higgs Bosons  $A/H$  Decaying to a Top Quark Pair in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 191803 (2017).
50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the dimuon decay of the Higgs boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 051802 (2017).
51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the  $e\mu$  channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 292 (2017).
52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “High- $E_T$  isolated-photon plus jets production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. B* **918**, 257 (2017).
53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for the  $Z\gamma$  decay mode of the Higgs boson and for new high-mass resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 112 (2017).
54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the  $W$   $tb$  vertex structure in  $t$ -channel single-top-quark production and decay in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1704**, 124 (2017).
55. 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 events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 112010 (2017).
56. 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 a Higgs Boson Decaying to  $b\bar{b}$  using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 181804 (2017).
57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive jet cross-sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1709**, 020 (2017).

58. 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  $b$ -tagged jets and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 195 (2017).
59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **96**, 112004 (2017).
60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of electroweak  $Wjj$  production and constraints on anomalous gauge couplings with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 474 (2017).
61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $\psi(2S)$  and  $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 117 (2017).
62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $ZZ$  production cross section in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the  $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\ell'^-\ell'^+$  and  $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\nu\bar{\nu}$  channels with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 099 (2017).
63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive and differential cross sections in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1710**, 132 (2017).
64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}\gamma$  production cross section in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 086 (2017).
65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of integrated and differential cross sections for isolated photon pair production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **95**, 112005 (2017).
66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair to  $Z$ -boson cross-section ratios at  $\sqrt{s} = 13, 8, 7$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1702**, 117 (2017).
67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous electroweak production of  $WW/WZ$  in association with a high-mass dijet system in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **95**, 032001 (2017).



68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top quark spin observables in  $t\bar{t}$  events using dilepton final states in  $\sqrt{s} = 8$  TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1703**, 113 (2017).
69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 191 (2017).
70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet  $p_T$  correlations in Pb+Pb and  $pp$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **774**, 379 (2017).
71. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Track Reconstruction Algorithms in Dense Environments in LHC Run 2,” Eur. Phys. J. C **77**, 673 (2017).
72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Analysis of the  $Wtb$  vertex from the measurement of triple-differential angular decay rates of single top quarks produced in the  $t$ -channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1712**, 017 (2017).
73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the strong coupling constant  $\alpha_s$  from transverse energy-energy correlations in multijet events at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 872 (2017).
74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in events with a Higgs or  $Z$  boson, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1708**, 006 (2017).
75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of charged-particle distributions sensitive to the underlying event in  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC,” JHEP **1703**, 157 (2017).
76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for triboson  $W^\pm W^\pm W^\mp$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 141 (2017).
77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of  $Z\gamma$  production in association with a high-mass dijet system in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1707**, 107 (2017).

78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Top-quark mass measurement in the all-hadronic  $t\bar{t}$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1709**, 118 (2017).
79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity produced in top-quark events with an electron, a muon and two  $b$ -tagged jets in the final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 220 (2017).
80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $W$  boson angular distributions in events with high transverse momentum jets at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 132 (2017).
81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $W^+W^-$  production cross section in  $pp$  collisions at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **773**, 354 (2017).
82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of charge and CP asymmetries in  $b$ -hadron decays using top-quark events collected by the ATLAS detector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” JHEP **1702**, 071 (2017).
83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with large jet multiplicities and missing transverse momentum using large-radius jets and flavour-tagging at ATLAS in 13 TeV  $pp$  collisions,” JHEP **1712**, 034 (2017).
84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Femtoscopia with identified charged pions in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with ATLAS,” Phys. Rev. C **96**, 064908 (2017).
85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of lepton differential distributions and the top quark mass in  $t\bar{t}$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 804 (2017).
86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $WW/WZ \rightarrow \ell\nu qq'$  production with the hadronically decaying boson reconstructed as one or two jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS, and constraints on anomalous gauge couplings,” Eur. Phys. J. C **77**, 563 (2017).
87. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification and rejection of pile-up jets at high pseudorapidity with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 580 (2017). Erratum: [Eur. Phys. J. C **77**, 712 (2017).]

88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 466 (2017).
89. 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 electroweak production of dijets in association with a Z boson in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **775**, 206 (2017).
90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of  $WW\gamma$  and  $WZ\gamma$  production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV and search for anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 646 (2017).
91. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC,” *JINST* **12**, P12009 (2017).
92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $k_t$  splitting scales in  $Z \rightarrow \ell\ell$  events in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1708**, 026 (2017).
93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of detector-corrected observables sensitive to the anomalous production of events with jets and large missing transverse momentum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 765 (2017).
94. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of b-hadron pair production with the ATLAS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *JHEP* **1711**, 062 (2017).
95. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of ordered hadron chains with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 092008 (2017).
96. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross section in the  $\tau$  + jets final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **95**, 072003 (2017).
97. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Drell-Yan triple-differential cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *JHEP* **1712**, 059 (2017).
98. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker in Run 1 of the LHC: tracker properties,” *JINST* **12**, P05002 (2017).

99. M. Yamada, K. Hara *et al.*, “Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector”, JINST 13 (2018) C01037.
100. T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, “Front-end electronics of double SOI X-ray imaging sensors”, JINST 12 (2017) C02004.
101. Y. Unno, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Development of n<sup>+</sup>-in-p planar pixel quad-sensor flip-chipped with FE-I4 readout ASICs”, JINST 12 (2017) C01084.
102. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Detection of on-surface objects with an underground radiography system using cosmic-ray”, PTEP 2017, 053C01.
103. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range  $0 < \cos \theta < 0.37$  for momentum threshold up to 11.6 GeV/ $c$ ”, PTEP 2017, 123C01.
104. K. Kamada, T. Iida, *et al.*, “Single crystal growth and scintillation properties of Ca(Cl, Br, I)<sub>2</sub> single crystal”, Ceramics International, 43 (Suppl. 1), S423-S427 (2017).
105. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, “Background studies of high energy  $\gamma$  rays from ( $n, \gamma$ ) reactions in the CANDLES experiment”, Astroparticle Physics, 100, 54-60 (2018).
106. 金 信弘, 受川史彦, 「CDF 実験 30 年の軌跡と物理成果」, 日本物理学会誌 60, 388 (2017).

## (2) 会議・研究会報告書

1. 若狭玲那, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 永田和樹, 浅野千紗, 笠島誠嘉, 菅野洋信, COBAND 実験メンバー, “COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発”, 電子情報通信学会技術研究報告 SCE, **117(223)**, 5-8 (2017).
2. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, “Performance of updated shielding system in CANDLES”, AIP Conference Proceedings 1921(1):060003 (2018).
3. W. M. Chan, T. Iida, *et al.*, “Development of CANDLES Low Background HPGe Detector and Half-life Measurement of <sup>180</sup>Ta<sup>m</sup>”, AIP Conference Proceedings 1921, 030004 (2018).

## (3) 学会・研究会での講演・ポスター発表（国内）

1. 浅野千紗：ニュートリノ崩壊光探索実験における STJ 検出器較正用光源の開発, 第 7 回高エネルギー春の学校（2017 年 5 月 18–20 日）, 滋賀県大津市北小松, 湖邸滋びわこクラブ.

2. 原和彦：FNAL, Test Beam の結果 FPIX,  
第 8 回新学術領域研究会「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(2017年6月29-30日), 宮崎大学. (招待講演)
3. 鈴木淳貴：HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けたプラナー型微細ピクセル検出器の性能評価 1,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
4. 本多俊介：LHC-ATLAS 実験 Run2 における  $H \rightarrow b\bar{b}$  崩壊過程でのヒッグス粒子  $t\bar{t}H$  生成過程探索,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
5. 大川英希：ATLAS 実験 13TeV データを使ったヒッグスなどの測定と新物理探索,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学. (企画講演)
6. 和田冨：ATLAS エンドキャップ用 R0 シリコンストリップセンサーの基礎特性評価,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
7. 浅野千紗：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 III,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
8. 若狭玲那：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 IV,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
9. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 II,  
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
10. 武政健一：COBAND 実験に用いる Hf-STJ の開発研究,  
超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (2017 年 10 月 4-5 日), 東北大学片平キャンパス.
11. 若狭玲那：COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発,  
超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (2017 年 10 月 4-5 日), 東北大学片平キャンパス.
12. 飯田崇史：CaI2 シンチレータの開発,  
Scintillator for Medical, Astroparticle and Environmental Radiation Techniques 2017 (SMART2017) (2017 年 11 月 11 日), 蔵王温泉ホテル樹林. (招待講演)
13. 大川英希：素粒子実験における多変量解析・機械学習・深層学習などのビッグデータ解析 - LHC-ATLAS 実験を例に,  
大規模複雑データの理論と方法論, 及び, 関連分野への応用 (2017 年 12 月 1-3 日), 筑波大学. (招待講演)
14. 金信弘：Introduction to Development of Superconducting Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11-13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.

15. 武内勇司 : Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017年12月11-13日),  
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
16. 武内勇司 : Feasibility of sub-GeV mass dark matter search using STJ detector for COBAND experiment,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017年12月11-13日),  
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
17. 武政健一 : R&D status of Hf-STJ,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017年12月11-13日),  
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
18. 若狭玲那 : Development of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017年12月11-13日),  
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
19. 浅野千紗 : Single Photon Detection by Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI Amplifier for COBAND experiment,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017年12月11-13日),  
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
20. 原和彦 : ITK Strip Detector,  
ATLAS 日本シリコンワークショップ (2017年12月20-21日), 大阪大学.
21. 飯田崇史 : チュートリアル講演 : シンチレータの原理と応用例,  
第4回超新星ニュートリノ研究会 (2018年1月9日), 箱根・強羅青雲荘. (招待講演)
22. 原和彦, 他 : 宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子力発電所1-3号炉の核燃料デブリの観測,  
TIA 光量子シンポジウム (2018年2月7日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
23. 和田冴, 原和彦, 他 : 4次元飛跡検出器のための内部増幅機能付きシリコンLGADの開発研究,  
TIA 光量子シンポジウム (2018年2月7日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
24. 岩波四季恵, 原和彦, 他 : SOI技術を用いた高位置分解能中性子検出器の開発研究,  
TIA 光量子シンポジウム (2018年2月7日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
25. 鈴木淳貴 : HL-LHC ATLAS 検出器アップグレードに向けたストリップセンサーにおけるIV長期安定性と湿度依存性,  
日本物理学会第73回年次大会 (2018年3月22-25日), 東京理科大学野田キャンパス.
26. 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性能評価,  
日本物理学会第73回年次大会 (2018年3月22-25日), 東京理科大学野田キャンパス.

27. 本多俊介：LHC-ATLAS 実験 Run2 における  $H \rightarrow b\bar{b}$  崩壊過程でのヒッグス粒子  $t\bar{t}H$  生成過程探索結果,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
28. 大鳴匡至：内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) の中性子照射損傷の評価,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
29. 和田冴：内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の基礎特性評価,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
30. 若狭玲那：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 VI,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
31. 笠島誠嘉：COBAND 実験極低温増幅器開発に向けた FD-SOI FET 極低温特性の測定,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
32. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 III,  
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.

#### (4) 国際会議・研究会での口頭発表

1. H. Okawa, “Search for Dark Matter in Events with a Single Boson and Missing Transverse Momentum using the ATLAS Detector”,  
An Alpine LHC Physics Summit (ALPS) 2017, April 17 – 22, 2017, Tirol, Austria. (招待講演)
2. K. Sato, “Search for neutral and charged BSM Higgs Bosons with the ATLAS detector”,  
Phenomenology 2017 Symposium, May 5 – 8, 2017, Pittsburgh, USA. (招待講演)
3. S. Honda, “Measurement of cross sections and couplings of the Higgs Boson using the ATLAS detector”,  
QCD17, 20th High-Energy Physics International Conference in Quantum Chromodynamics, July 3 – 7, 2017, Montpellier, France. (招待講演)
4. S. Honda, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into  $b\bar{b}$  in the ATLAS detector”,  
3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, October 2 – 5, 2017, Moscow, Russia. (招待講演)
5. H. Okawa, “Latest LHC Results & Prospects on Measurements & Searches in the Higgs Sector”,  
20th New Higgs Working Group Meeting, August 18 – 19, 2017, Osaka, Japan. (招待講演)
6. H. Okawa, “Highlights of LHC Higgs Results, Related Searches & Prospects for Future”,

21st New Higgs Working Group Meeting, December 22 – 23, 2017, Osaka, Japan.  
(招待講演)

7. K. Hara, “Fine Pixel Detector FPIX Developed Based on SOI Technology”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 –  
26, 2017, Beijing, China.
8. S.H. Kim *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detec-  
tors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 –  
26, 2017, Beijing, China.
9. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of STJ with FD-SOI cryogenic amplifier as a far-  
infrared single photon detector for COBAND experiment”,  
17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-17), July 17 –  
21, 2017, Fukuoka, Japan.
10. K. Hara, “Recent Development of Silicon-on-Insulator Pixel Devices”, VERTEX2017,  
September 10 – 15, 2017, Les Caldas, Spain. (招待講演)
11. S. B. Kim, “New Results from RENO”,  
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL  
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
12. T. Iida, “COBAND Project for Cosmic Background Neutrino Decay Search and  
Rocket Experiment Design”,  
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL  
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
13. K. Takemasa, “Status of Photo-Detector Development Based on STJs for COBAND  
Project”,  
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL  
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
14. H. Okawa, “Highlights from the ATLAS Experiment”,  
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL  
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
15. Y. Takeuchi, “Superconducting Tunnel Junction Detectors”,  
18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino De-  
tectors (NNN17), October 26 – 28, 2017, University of Warwick, Coventry, UK. (招  
待講演)
16. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector  
and Cold Amplifier for COBAND experiment”,  
International Workshop on Superconducting Sensors & Detectors (IWSSD2016),  
Nov. 14 – 16, 2016, AIST Tsukuba Campus, Tsukuba-shi, Japan



17. S. H. Kim *et al.*, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND experiment”,  
Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 – 6, 2018,  
Kyoto University, Kyoto, Japan. (招待講演)
18. Y. Takeuchi, “Division of Elementary Particles”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
19. K. Hara, “Division for Development of Photon and Particle Detectors”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
20. S. B. Kim, “Reactor Neutrino Physics and Prospect”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
21. Y. Takeuchi, “Introduction to COBAND project”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
22. A. Kasajima, “Measurements of SOI FETs at Cryogenic Temperature”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
23. C. Asano, “R&D Status of Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI amplifier for COBAND”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
24. K. Takemasa, “R&D Status of Hf-STJ for COBAND”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
25. T. Yoshida, “R&D Status of FIR source for STJ calibration for COBAND”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
26. J. Suzuki, “Development of ATLAS Pixel Detectors for the HL-LHC”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
27. R. Wakasa, “R&D of quantum photo-sensor based on superconductor with cryo-SOI  
readout”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
28. S. Wada, “Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) for 4D Tracking”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26  
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.

29. K. Hara, “Silicon-on-Insulator (SOI) Pixel Detector”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
30. K. Sato, “Standard Model measurements at the ATLAS experiment”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
31. H. Okawa, “Searches for physics beyond the Standard Model at the ATLAS experiment”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
32. S. Honda, “Search for the Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into bottom quarks with the ATLAS detector”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
33. M. Hagihara, “Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
34. Y. Ikegami, “Status of the ATLAS inner tracker for the Phase II upgrade”,  
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
35. H. Okawa, “Unveiling the Higgs & Dark Sectors at the LHC”,  
Seminar at the University of Science and Technology of China, Hefei, China, January 11, 2018.
36. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment -”,  
NAPP Seminar, April 28, 2017, Seoul National University, Seoul, Korea.
37. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment -”,  
KASI Colloquium, July 19, 2017, KASI, Taejeong, Korea.
38. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment - Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ”,  
Research Technique Seminar, November 21, 2017, FNAL, Illinois, USA.
39. K. Takemasa, “R&D status of Hf-STJ”,  
Seminar at KAIST, March 16, 2018, KAIST, Taejeong, Korea.
40. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment - Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ”,  
KNRC seminar, March 19, 2018, Seoul National University, Seoul, Korea.

## (5) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 – 26, 2017, Beijing, China. (ポスター発表)
2. T. Iida *et al.*, “Astro-particle physics with newly developed inorganic scintillator”,  
8th International Conference on New Development In Photodetection (NDIP17),  
July 3 – 7, 2017, Tours, France. (ポスター発表)
3. T. Iida *et al.*, “Multi-purpose detector using high light yield CaI2 crystal”,  
XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), July 24 – 28, 2017, Sudbury, Canada. (ポスター発表)
4. Y. Furuya, T. Iida *et al.*, “Crystal growth and scintillation properties of Eu doped  $\text{Ca}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_2$  solid solution”,  
7th International Workshop on Photoluminescence in Rare Earths: Photonic Materials and Devices (PRE’ 17) , November 30 – December 2, 2017, Rome, Italy.  
(ポスター発表)
5. C. Asano *et al.*, “STJ detector developments for the Cosmic Background Neutrino Decay experiment”,  
TGSW-IWP2017, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents, September 25 – 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (ポスター発表)
6. R. Wakasa *et al.*, “R&D of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment”,  
Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 – 6, 2018,  
Kyoto University, Kyoto, Japan. (ポスター発表)

## (6) 学位論文

### 博士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2018年2月

1. 萩原 睦人 : Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector (重心系エネルギー 13TeV の陽子陽子衝突における ATLAS 検出器を用いた  $tb$  に崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索)
2. 本多 俊介 : Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector (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)

## 修士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2018 年 2 月

1. 遠藤 駿 : テストビームによる高精細 SOI ピクセル検出器の性能評価
2. 鈴木 淳貴 : HL-LHC 用 ATLAS シリコンピクセル検出器の微細化及びシリコン検出器における IV 長期安定性の研究
3. 若狭 玲那 : COBAND 実験に向けた STJ 光応答信号増幅のための極低温電荷積分型前置増幅器の研究開発

## 【構成員の異動】

2018 年 4 月 : 金信弘特命教授が着任.