

## II. 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
准教授	原 和彦
講師	武内 勇司, 佐藤 構二
助教	大川 英希
研究科特別研究員	武政 健一
大学院生	20 名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験 CDF, ATLAS, および ILC の研究を行っている。CDF は 2011 年度に運転終了, ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始, ILC は技術設計中の実験である。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を目的とした高分解能光検出器 STJ の開発, 宇宙線ミュー粒子を用いた大規模構造物の透視を行っている。

### 【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。1996 年の物理実験 Run I の終了後 CDF 検出器およびテバトロン加速器は, 1996 年の物理実験 Run I の終了後の大幅な増強を経て 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多くが終了し, 最終結果を論文として公表する段階にある。2014 年には 19 篇の原著論文が公表された。以下に 2014 年度の成果について主なものを記す。

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見からおよそ 20 年が経過し, Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いてその様々な性質が詳細に研究されている。テバトロンでのトップクォーク生成は, クォーク・反クォーク対を始状態とする対生成が主である。

その質量は多くの終状態を用いて測定されている。2014 年には, CDF 実験と D0 実験の測定を総合した Run-II 実験の最終結果が  $m_{\text{top}} = 174.34 \pm 0.37 \pm 0.52 \text{ GeV}/c^2$  と得られた(図 1 (左))。

また, トップクォーク対の生成機構の研究を継続して行った。 $t\bar{t}$  対の前後方非対称度に着目し, 2010 年度には  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  相当のデータを用いて dilepton チャンネルにおける初めての測定を行った。2014 年度には, 論文発表に向け, 全データを用いた dilepton チャンネルの解析を継続した。

### 【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は, 2012 年までの RUN-1 を経て 2014 年度は重心系エネルギーを 13 – 14 TeV に増強するための工事が行われた。2015

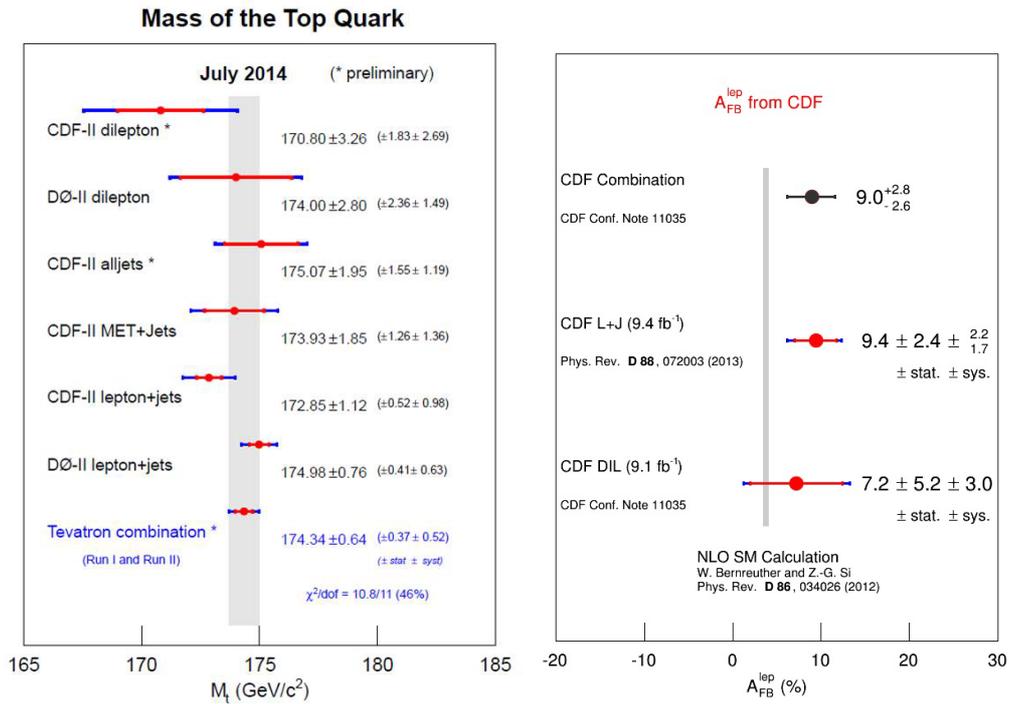


図 1: (左): CDF および D0 実験によるトップクォークの質量の測定。(右): CDF 実験でのトップクォーク対崩壊による荷電レプトンの前後方非対称度。

年度からは RUN-2 が始まる。重心系エネルギーが上がることにより、ヒッグス粒子の生成断面積が増大し、より統計精度をあげた測定が期待できる。

ATLAS 実験グループはこの間にヒッグス粒子の様々な粒子への崩壊断面積の測定を完了した。本グループは  $b$  クォーク対に崩壊するモードに対し、測定感度を上げた解析を実施した。また、2023 年以降は、LHC は設計値を超えた高輝度実験、HL-LHC 加速器に増強される予定である。放射線レベルも現在の検出器設計の 10 倍に達するため、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も継続している。

## (1) ヒッグス粒子の崩壊と結合定数

質量の起源とされるヒッグス粒子は 2012 年末に発見された。現在は、精密測定を通して、標準模型の枠組みどおりヒッグス粒子はすべての素粒子に質量を与えるのか、他にヒッグス粒子はあるのかについての研究を進めている。

ATLAS 実験による様々な粒子対へのヒッグス生成断面積の最新結果を図 2 にまとめる。 $W/Z$  ゲージ粒子に質量を与えることはヒッグスの発見により確立したが、今年度は初めてレプトン ( $\tau$ ) に対しても高い精度で質量を与えることが判明し、また、 $b$  対に崩壊する解析に重要な進展が得られた。クォーク ( $b$ ) に質量を与えるかに関しては、測定された中心値が低めであったために、十分な確立には至っていないが、標準模型との明らかな差異もない。再開する RUN-2 のデータにより明らかにしていく。

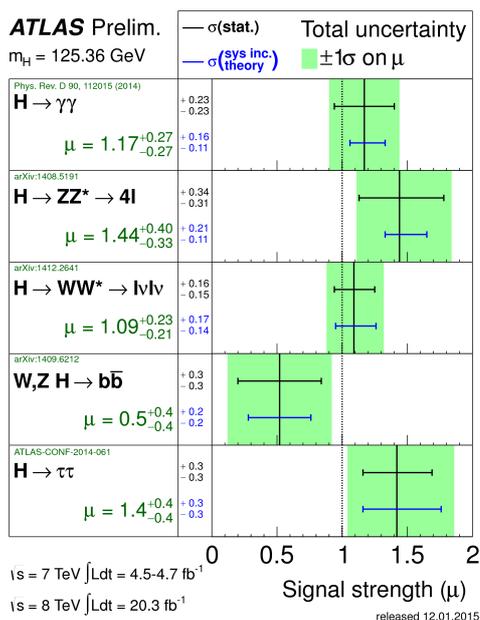


図 2: ATLAS によるヒッグス粒子の様々な粒子対への崩壊断面積測定の結果。値は標準模型での予想値で規格化したもの。

## (2) ヒッグスのフェルミオンとの結合

ヒッグスが  $W/Z$  粒子に質量を与えることはヒッグスの定義であるが、湯川結合によりフェルミ粒子にも質量を与えるかは標準模型の検証において最も重要なステップである。

レプトンに関する測定として、 $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  モードの測定感度を図 3 に示す。多変数解析による解析法の最適化により 2014 年度にこのモードでバックグラウンドを超過する有意な信号が得られた。生成断面積は、標準模型の生成断面積で規格化して  $\mu = 1.43^{+0.43}_{-0.37}$  である。これは統計的に  $4.5\sigma$  の有意度であり、 $\tau$  粒子に対してヒッグスが質量を与える重要な証拠であると見なせる。

クォークに対しては  $b$  が最も観測できる可能性が高い。QCD のバックグラウンドが多いため、 $H \rightarrow b\bar{b}$  単独ではなく、 $W/Z$  粒子が随伴されるモードで  $W$  や  $Z$  が崩壊して発生する高運動量のレプトンをトリガーにすることで探索した。このチャンネルでも多変数解析で信号/バックグラウンド比を最適化する解析法を用いた。図 4 は、この解析法で  $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在しない場合に、生成断面積に対してどの程度の制限を与えられるかを、期待値 (破線) およびその精度を  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  の帯として示している。点線は標準模型の  $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在する場合である。データはその中間 (黒点) に位置し、 $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在するという統計的な有意度は  $125.36 \text{ GeV}/c^2$  の質量では  $1.4\sigma$  である。これは標準模型での期待値  $2.6\sigma$  を下回り、実際に  $H \rightarrow b\bar{b}$  生成断面積は標準模型で規格化して  $\mu = 0.52 \pm 0.32(\text{stat}) \pm 0.24(\text{syst})$  にとどまった。標準模型とは統計的に矛盾しないが、明らかな生成の証拠とは言えない。図 5 は  $b\bar{b}$  候補事象の不変質量分布を、ボゾン対 ( $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ ) 生成と標準模型から期待される分布と比較したものである。これは  $8 \text{ TeV}$  での衝突データであり一致度は良いが、 $7 \text{ TeV}$  のデータや他の探索モードも統合すると  $\mu = 0.52$  にとどまる。統計量を上げた測定が不可欠である。

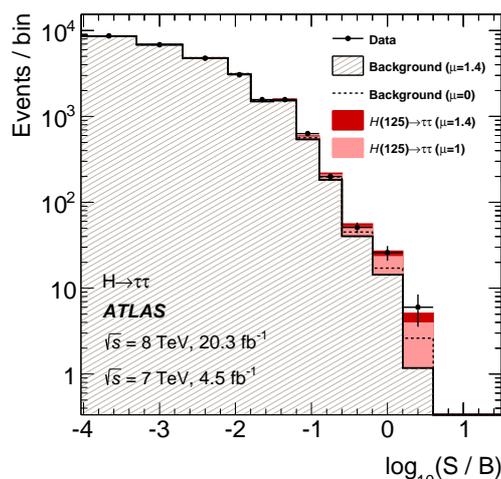


図 3:  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  候補事象数を多変数解析における信号期待量とバックグラウンド量の比の関数として示す。信号が期待できる正の領域でバックグラウンドのみより有意に多い事象数を示している。この新しい解析で統計的に  $4.5\sigma$  の有意度で  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  が観測された。

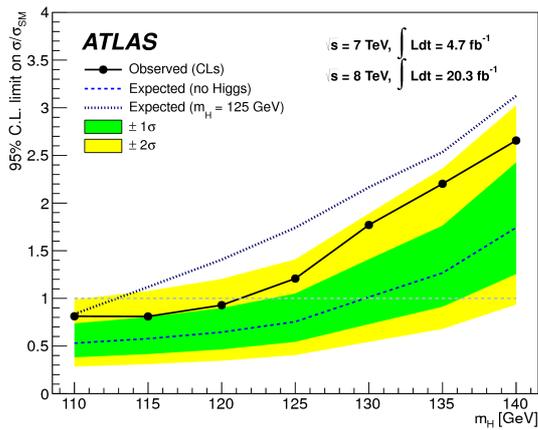


図 4:  $H \rightarrow b\bar{b}$  生成が存在しない場合の期待される生成断面積の上限値 (破線および  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  の領域)。標準模型 (点線) の期待に対して、測定値 (黒点) は中間に位置した。

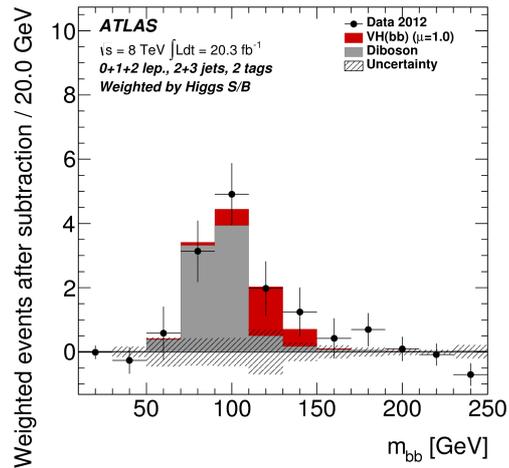


図 5:  $H \rightarrow b\bar{b}$  探索のために、ボゾン対生成以外のバックグラウンドを差し引いた  $b\bar{b}$  質量の分布と 8 TeV でのデータの比較。赤は標準模型で期待される  $H \rightarrow b\bar{b}$  分布。

### (3) ヒッグス粒子の質量

ヒッグス粒子の質量や生成断面積は標準模型の検証および標準模型を超える物理を示唆する場合に重要なパラメータとなる。ヒッグス粒子の質量について ATLAS と CMS を統合した測定を図 6 に示す。この質量の測定ではニュートリノ発生に伴う消失エネルギーのない  $H \rightarrow \gamma\gamma$  と  $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4l$  の崩壊モードだけに限って解析に用いた。ヒッグスの質量と生成断面積には相関があるため、図 7 には生成断面積の測定への依存性も示している。2つの解析モードの生成断面積の標準模型との比は共通であると仮定して、これらの質量値を同時にフィットした結果は  $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$  である。評価に用いた両グループの両モードでの値はこの統合値に統計的に矛盾しない。

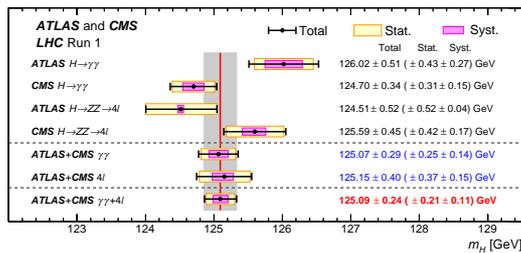


図 6: ATLAS と CMS によるヒッグス粒子質量の測定とその総合値。生成断面積は、標準模型との比が共通であると仮定している。

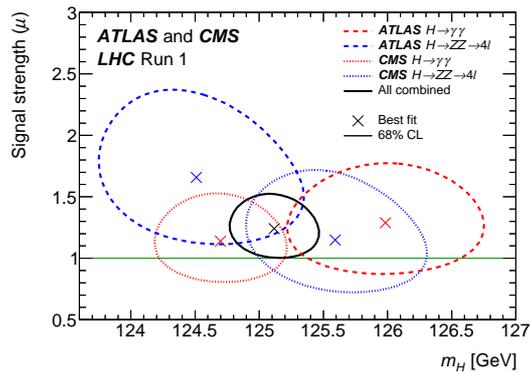


図 7: ATLAS と CMS によるヒッグス粒子質量と生成断面積の測定。

#### (4) ヒッグス以外の物理

超対称性粒子や標準模型を超える物理結果の重要なアップデートはない。トップ質量の測定結果に関して ATLAS は統合値を発表した。トップクォークは  $W + b$  に崩壊するが、質量値は、 $W$  の崩壊モード毎に質量を直接測定したもの、生成断面積から間接測定したものに分類されるが、これらをまとめると  $172.99 \pm 0.91 \text{ GeV}/c^2$  を得た。Tevatron での測定値は  $174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}/c^2$  であり、中心値の差異に矛盾はなく、また、ATLAS は比較できる程度の測定精度を達成していると言える。

#### (5) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

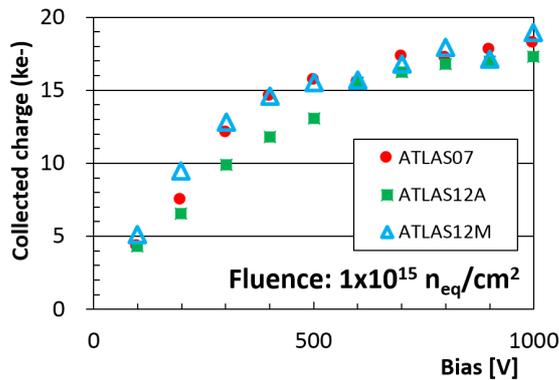


図 8: 通過する  $\beta$  線で評価した収集電荷量の電圧依存性。1 MeV 中性子に換算した粒子数  $10^{15}/\text{cm}^2$  の損傷を与えたサンプル。

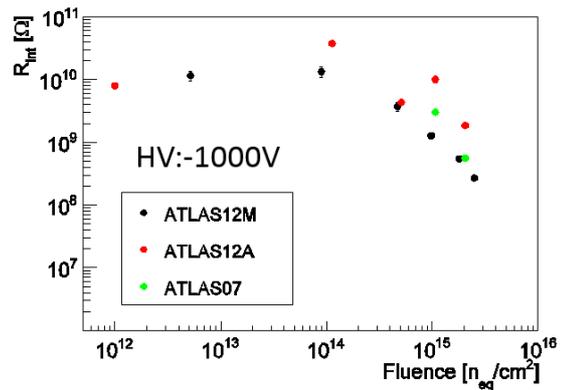


図 9: 電極間抵抗の照射量（中性子数換算）依存性。バイアス電圧は 1000 V。

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、2023 年から当初設計値を超え、年間  $200\text{-}250 \text{ fb}^{-1}$  の衝突をめざす高輝度 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ため、シリコン半導体検出器による新しい内部飛跡検出器の開発研究を継続して行った。

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) の開発を継続して行い、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設計をしている。

最内層は電極サイズが  $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$  のピクセル型、外層は、 $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$  のストリップ型で、それぞれ最大  $2 \times 10^{16}$ 、 $1 \times 10^{15}$  1-MeV  $n_{eq}/\text{cm}^2$  を受けても使用可能であると証明した。

図 8 は東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームをストリップ型サンプルに照射して貫通する  $\beta$  線に対して収集できる電荷量を評価したものである。サンプルは旧設計 (ATLAS07)、新設計 (ATLAS12A, M) にかかわらず、ウェハの初期抵抗で振舞いに違いがあるが、電圧を上げることで収集電荷量は増加する。ノイズは 500 電子程度であるので、最大照射量を浴びても十分な電荷を収集できる。収集電荷量の減少は、損傷によりキャリアのトラップが増えるためであるが、移動度の高い電子を収集する p 型基板ではこの影響が少ないことが利点として挙げられる。

バルク基板の損傷に対して表面の損傷は様々な影響を与える。例えば電極間抵抗が低下するとクロストークが増えるが、図 9 は電極間抵抗を照射量の関数として測定したものであ

る。照射量とともに劣化が見られるが、クロストークの基準を決めるバイアス抵抗 (1.5 M $\Omega$ ) と比較して充分に高いので問題はない。電極間抵抗は測定温度やバイアス電圧により変わるが、変化の主要因は、バルク損傷による暗電流の増加であることを明らかにした。これにより、センサーの表面自体に電極間抵抗を変化させる損傷が発生するのはなく、測定方法に起因する影響と理解できる。しかしながら暗電流の影響により実効的な抵抗が低下するために、運転温度に対する要求などを明確にしていく必要がある。

p型基板を用いたピクセル型センサーも試作し、DESYの電子ビームを用いて性能評価を継続した。

### 【3】 SOI技術を用いた読み出し回路一体型ピクセル検出器

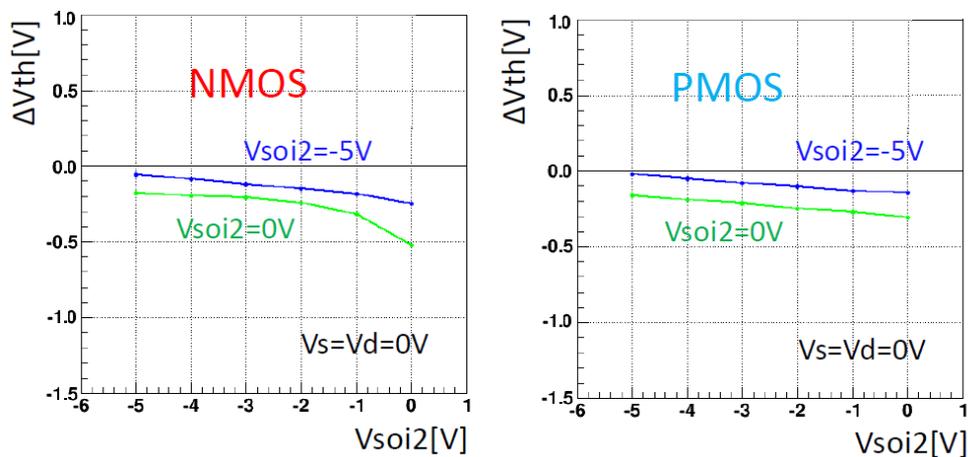


図 10: ガンマ線照射中に SOI2 層へ 0 V, 5 V の電圧をかけた場合の FET 閾値電圧の照射前からの変動。横軸は照射後の FET 評価時に加えた SOI2 電圧の値。(左) NMOS, (右) PMOS。

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 重 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 重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。

トランジスタに  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線を照射して、トランジスタ特性変化の線量依存性を測定し、SOI2 に適切な負の電圧を加えることで原理的に SOI2 センサーを 1 MGy を越えて作動させられることを初めて示した。2014 年度は、特に照射中の SOI2 への電圧の有無による劣化の差異を評価した。図 10 は照射中に SOI2 に 0 V または -5 V を印可して 100 kGy の照射を行った後に、SOI2 に 0 V から -5 V を加えながらトランジスタの閾値電圧を測定したものである。SOI2 に電圧を加えながら照射した場合の方が閾値の変動が NMOS, PMOS ともに低減されることが分かる。

ピクセル回路には、様々なタイプのトランジスタが使われているので、個別に SOI2 電圧を調整するのではなく、依存性の大小に応じてグループ分けをして調整することは現実的である。2014 年度までに作成したものはすべて単一の SOI2 電圧設定をするものであり、完全な TID 補償が達成できず、センサーの作動点に変化しながらも未照射と同レベルの応答を示すことが分かってきた。

図 11 は積分型ピクセルセンサー INTPIXh2 のあるピクセル中央に焦点をあてて入射した赤外レーザーの応答を測定したものである。クロストークにより隣接ピクセルに信号が漏れ、その効果はセンサーが空乏化していない低バイアス電圧で顕著である。照射後には SOI2 に電圧を加える (加えないと信号は見られない) と低バイアスでのクロストークは低減している。これはピクセル間の酸化膜に正孔が蓄積され直下に電子層が形成され p 型のピクセル端子間の抵抗を高くしたものと解釈できる。

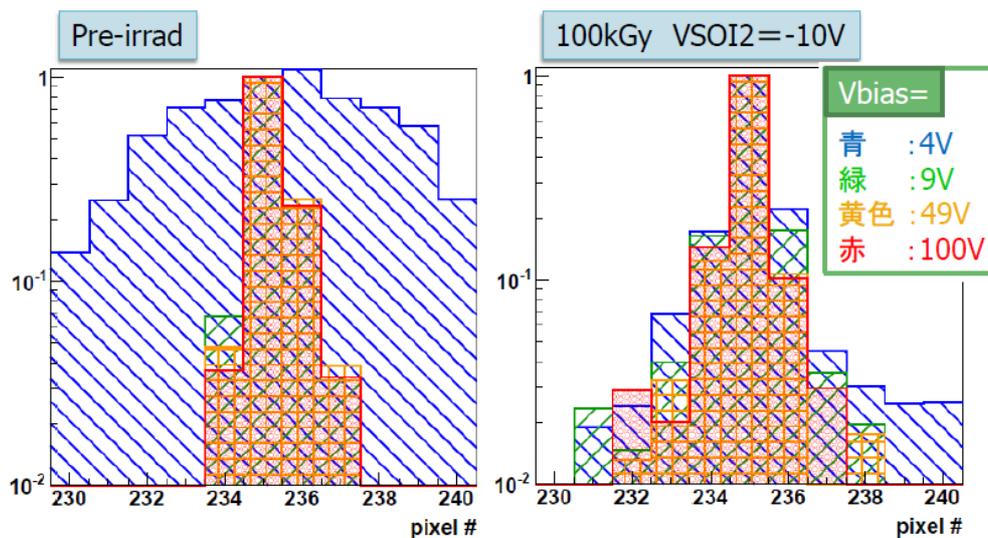


図 11: ある (235 番目) ピクセル中央に赤外レーザーを入射した場合の隣接ピクセルからの応答 (2重 SOI, 100  $\mu\text{m}$  厚)。バイアス電圧を変化させて測定している。(左) 未照射, (右) 100 kGy 照射 (-10 V の SOI2 電圧)。

また、図 12 はレーザーの時間応答を測定することで、INTPIXh2 回路の時間応答を初めて測定したものである。レーザーの約 50 ns の信号幅に対して 150 ns の応答が得られ、ピーク位置も約 40 ns で十分に速い。

電荷積分に波形整形回路を通したピクセル (PIXOR) に対し、照射により各部分の応答がどのように変化し SOI2 電圧の印可でどのように補償できるかを評価した。図 13 は、整形

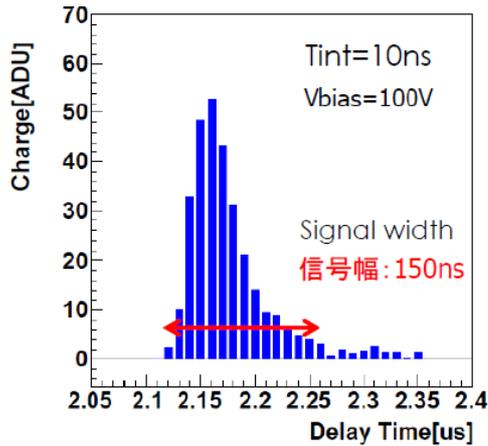


図 12: 信号幅が約 50 ns のレーザーパルスに対する積分型センサーの応答。ピークは 40 ns であり十分に速い信号処理が可能である。

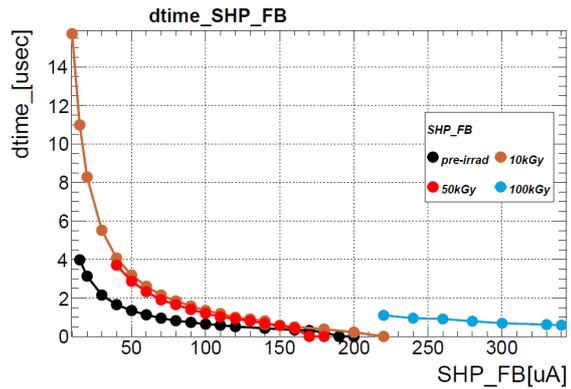


図 13: 2重 SOI 電荷積分+波高整形回路の出力幅を整形回路帰還電流を変えて測定。100 kGy 照射を受けても帰還電流を調整することで速い信号幅を維持できる。

回路を通した信号幅を、帰還電流を変えて測定したものである。帰還電流を増やすことで回路応答は速くなり、100 kGy 照射後も未照射に近い高速応答性を示すことが明らかにされた。この素子は BELL-2 実験を想定した素子であるが、初めて SOI 素子はその放射線環境でも作動することを実証した。

この経験を受けて国際リニア衝突器 ILC に使用できる素子の開発を継続している。これは新学術科研費の資金を使用し 2017 年までに完成させる計画で進めている。

#### 【4】 ILC 実験

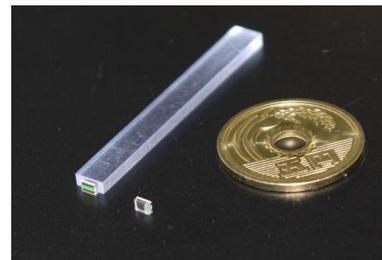
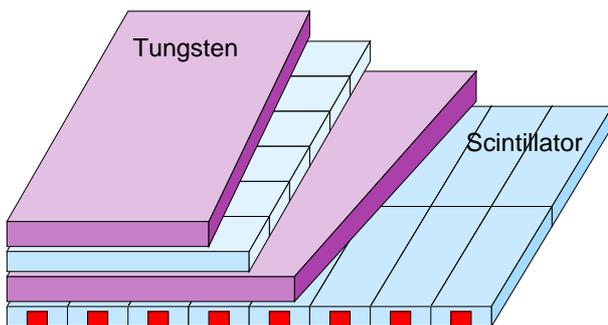


図 14: ILC (ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、シンチレータストリップ (43.5 mm × 5 mm × 2 mm) を横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。

次世代のエネルギーフロンティアにおける素粒子実験を遂行するため、重心系エネルギー 500 GeV の電子・陽電子衝突型線形加速器を建設する計画が提案されている。素粒子である電子を衝突に用いるので、加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ、ま

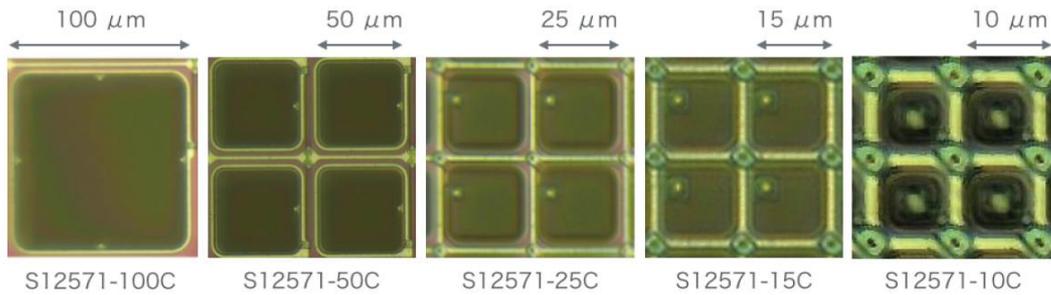


図 15: さまざまなピクセル数を持つ新型 MPPC の写真。

た背景事象の少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる。国際協力により進められているこの計画は ILC 計画と名付けられ、参加各国の大学や研究機関で精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている。計画では、その第一期において、重心系エネルギー 250 GeV からスタートし、500 GeV まで増強する。そして、第二期において重心系エネルギー 1 TeV までの加速器増強が想定されている。

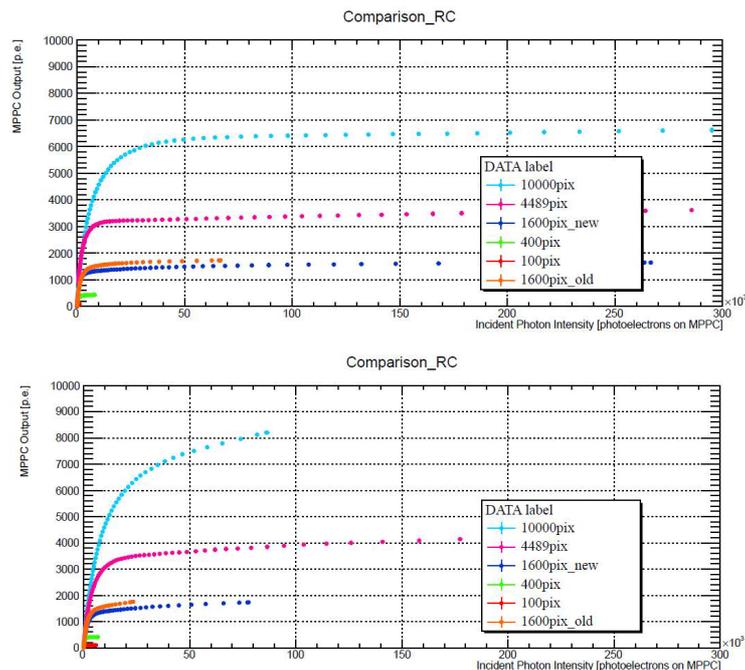


図 16: 新型の MPPC の出力応答の入射光量依存性。(上) : MPPC 単体にレーザー光を照射したもの。(下) : MPPC とシンチレータを組み合わせ、レーザー光を照射したもの。ピクセル数の増加に伴い、応答範囲が大きく向上している。

ILC 実験では、ゲージボソンやトップクォーク、ヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネギーを精密に測定することが非常に重要となる。ジェットに対するエネギー分解能は、 $\sigma(E)/E = 0.3/\sqrt{E(\text{GeV})}$  が要求されており、この要求値を実現する



図 17: 新型 MPPC の写真。トレンチ構造を持たないもの（左）と持つもの（右）。ピクセル境界部の黒く見える部分がトレンチ。

ため、Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネルギー測定方法が提唱されている。この方法を用いるには、カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネルギー分解能に加え、非常に細かいセルに分割された構造を有することが要求される。

現在筑波大学グループでは、信州大、九州大、新潟大等と共同で、ILC 実験において検討される検出器候補のひとつILD 検出器のうち、電磁カロリメータ (ECal) の研究開発を行っている。ILD の電磁カロリメータでは、候補の一つとしてシンチレータとタングステン板を積層構造にしたサンプリング型のものが考えられている（図 14）。

シンチレータは非常に細かいセル構造を持つため、読み出しチャンネル数が膨大となり、また磁場中に設置されることから、光センサーは非常にコンパクト且つ低コストで磁場の影響を受けないという特徴を持つ必要がある。これを果たすのは、現状では新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) がほぼ唯一の解である。

カロリメータの性能としてエネルギー分解能が重要であるが、それを決める要因に光センサーの検出効率と線形応答性がある。我々は、これまで、様々な仕様の MPPC を使い、さまざまな特性の測定・評価を行ってきた。2014 年度には、前年度から継続して、浜松ホトニクスにより開発された新型の MPPC の性能を評価した。この新型 MPPC では、クエンチング抵抗をポリシリコンから金属に変更することによってより微細な加工が可能となり、不感領域の減少とピクセルサイズの微小化、それに伴うピクセル数の増加（最大 10,000 ピクセル）を実現している（図 15）。これらは、検出効率と応答線形性の向上につながると期待されるが、実際に測定を行い評価した。ピクセル数 100, 400, 1600, 4489, 10000 を持つ新型 MPPC の線形応答性を図 16（上）に示す。これは MPPC 単体に速いパルスレーザー光を照射したものである。より実際の検出器に近づけた形として、シンチレータと MPPC を組み合わせたものにレーザー光を照射した場合の応答が図 16（下）である。いずれの場合もピクセル数の増加により応答範囲が拡大していることが判る。また、シンチレータ光の場合には、範囲はさらに拡大している。

新型 MPPC は、さらなる改良として、ピクセル間にトレンチと呼ばれる構造体を導入したものが開発された（図 17）。これにより、チャンネル間のクロストーク、ノイズ発生率、アフターパルスなどが減少すると期待される。実際に測定すると、これらが大幅に改善していることが判った（図 18）。特に、クロストークは、ほぼ無視できるレベルになっている。

また、これらの基礎データをもとにしてシンチレータストリップの形状、MPPC の仕様の最適化を図るとともに、単一光子を入射した場合についてカロリメータの現実的なシミュレーションを行い、エネルギー分解能や応答線形性など、検出器としての最終的な性能を評価した。

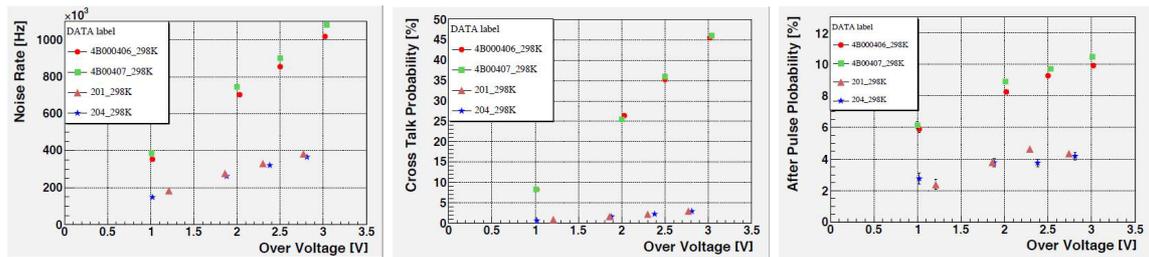


図 18: 新型 MPPC のトレンチ構造の有無による特性の比較。(左) : ノイズ発生率, (中) : クロストーク率, (右) : アフターパルス率。いずれもトレンチの導入により大幅に向上している。

## 【5】 超伝導赤外線検出器の開発

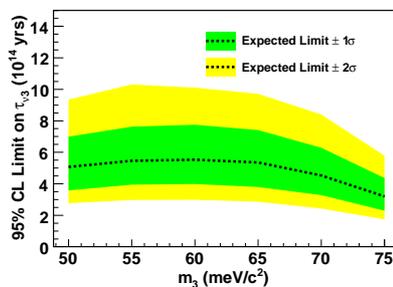


図 19: シミュレーションによる宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験で期待されるニュートリノ寿命下限値の分布。仮定したニュートリノ質量の関数としてあたえられている。直径 15 cm, 焦点距離 1 m の主鏡, および  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 8$  の受光面積の検出器を焦点位置に備えたロケット実験で 200 秒の測定を仮定。

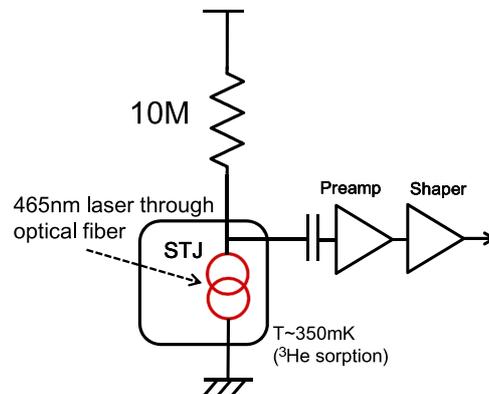


図 20: STJ の光パルス応答を電荷積分型アンプで読み出す回路。室温に置かれた電荷積分型プリアンプおよびシェーパアンプからなる。

過去 10 数年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界でひろく行われてきた。これは超伝導体が半導体と比較してはるかに小さいエネルギーバンドギャップを有することを利用して、半導体検出器などの既存の光検出器に比べてエネルギー分解能がはるかに高い光検出器を原理的に実現できることが強い動機となっている。このことから、高エネルギー分解能の X 線検出器や赤外線検出器への応用を目指して開発が進められてきた。

本開発研究では、ニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標として従来用いられている Nb (超伝導ギャップエネルギー  $\Delta = 1.55 \text{ meV}$ ,  $T_c = 9.23 \text{ K}$ ) を用いた Nb/Al-STJ やさらに  $\Delta$  の小さい Hf ( $\Delta = 0.020 \text{ meV}$ ,  $T_c = 0.165 \text{ K}$ ) を超伝導素材として用い、遠赤外線領域 ( $E_\gamma \sim$  数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数%の精度で測定するための超伝導体検出器 (STJ) の開発を目指している。

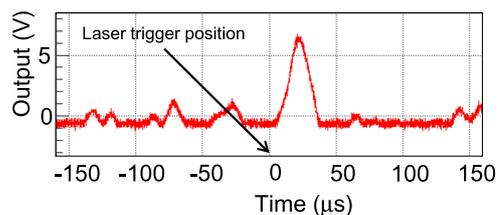


図 21: 産総研の CRAVITY で作製された  $100 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ の光パルス応答。光パルスは、可視光 ( $465 \text{ nm}$ ) のレーザーを用いた。STJ でレーザートリガー位置に検出された応答は、およそ 4 光子程度に相当。

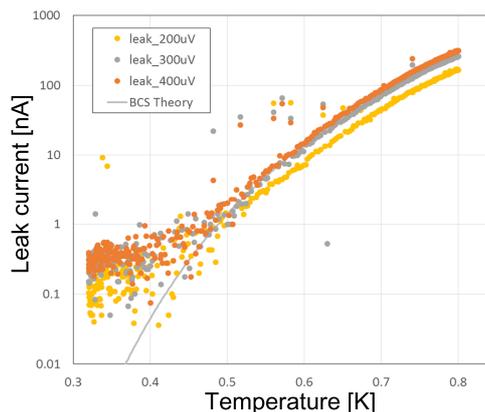


図 22: 産総研の CRAVITY で作製された  $50 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ の漏れ電流の温度依存性。

宇宙論により存在が予言されている宇宙背景ニュートリノが崩壊する際に発生する光子は、例えば重いニュートリノ ( $\nu_3$ ) の質量を  $\sim 50 \text{ meV}$  と仮定すると波長が  $50 \mu\text{m}$  (エネルギー  $25 \text{ meV}$ ) となる。我々は、宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションの結果から波長  $50 \mu\text{m}$  の光子一つ一つに対してエネルギー分光が可能な光検出器を用いてロケット実験により宇宙空間において 200 秒の測定で、現在のニュートリノ寿命下限値  $3 \times 10^{12}$  年を二桁改善できる可能性を示した (図 19)。

2007 年 1 月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学、KEK、理研の共同研究によって、Hf-STJ 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の確立を行い、2010 年度には、Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf による SIS 構造の作成に成功し、ジョセフソン電流を確認、2012 年度に Hf-STJ 試作サンプルでの可視光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認している。現在は、可視パルス光入射に対するパルス応答の確認、およびリーク電流の改善が課題である。

Hf-STJ 開発と並行して、既に作成方法の確立している Nb/Al-STJ を用いた一光子分光検出器の開発も行っている。Nb/Al-STJ 単体では、 $25 \text{ meV}$  の光子に対して十分なエネルギー分解能は期待できないが、一光子計数が実現できれば回折格子と組み合わせることで Nb/Al-STJ のピクセルをアレイ状並べることでエネルギー分光能力を得ることが可能となる。Nb/Al-STJ では、室温アンプを用いた読み出しにおいて可視光～近赤外までの一光子検出、一光子分光の報告例がある。我々も、過去の年次報告で述べてきたように、これまでに室温アンプを用いた読み出しを試み、電荷積分型アンプでの可視光数光子の読み出しまでは達成している (図 20, 図 21) が、読み出し系のノイズ、および Nb/Al-STJ の漏れ電流等の要因により、一光子検出には至っていない。

これらの問題を解決するために、産総研との共同研究による産総研 CRAVITY で作製された漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに Nb/Al-STJ 極低ノイズ読み出し系として、極低温で動作する SOI (Silicon On Insulator) プロセスによるアンプおよび、SOI 上に直接 STJ を形成する SOI-STJ の開発も行っている。CRAVITY で作製された  $50 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ サンプルでは、 $300\text{mK}$  において漏れ電流  $200\text{pA}$  を示した (図 22)。我々の要求する性能は、 $25 \text{ meV}$  の一光子を  $30 \text{ Hz}$  以下のダークカウントレートで計数することであるが、そのために漏れ電流は、 $100 \text{ pA}$  以下である必要がある。漏れ電流がトンネル接合面の面積に比例すると仮定すると、この要求の達成は、十分可能であると期待される。SOI に

よる読み出し回路に関しては、SOI 上の MOSFET が STJ の動作温度においてトランジスタとして機能することが確認されたことは、既に昨年度において報告した。現在は、実際の STJ の信号読み出しに使用可能な高速、且つ低消費電力の電荷積分アンプを設計中である。

## 【6】 ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視

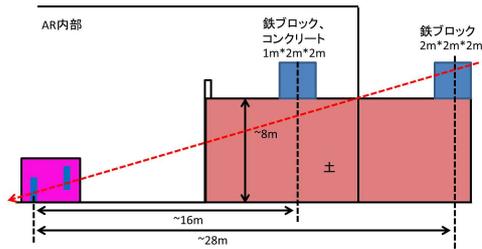


図 23: 測定セットアップの概略図。地下に設置された検出器（ピンク）から地上の鉄ブロック標的（青）を測定することにより、ミューオンが地中を長く通る条件で測定を行った。

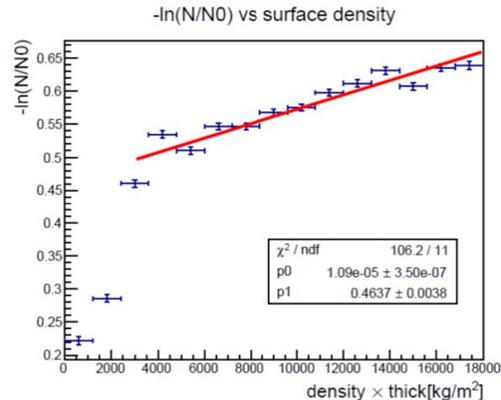


図 24: 通過した物質質量に対するミューオン透過率の依存性。物質質量が 4,000 kg/m<sup>2</sup> から 18,000 kg/m<sup>2</sup> の範囲では透過率は指数関数で減少し、一つの吸収係数で表される。

宇宙線  $\mu$  粒子を使って、原子炉などの大規模構造体内部構造の透視の研究を行った。これは福島原子炉事故を受けて、高エネルギー加速器研究機構らと協力して、2011 年秋から準備を始めたものである。2012 年 3 月には 1 m × 1 m の有感面積をもつシンチレータ面（1 cm 幅のシンチレータバーを縦横に 100 本ずつ並べたもの）4 セットからなる検出器を実際の原子炉に設置して実証実験を開始した。シンチレータ光を波長変換ファイバーで取り出し MPPC で読み出す方式は、本研究室が開発してきた技術であり、FPGA による読み出し回路の構成など高エネルギー実験の技術を応用している。

2013 年 12 月まで炉心から 64 m 離れた 3 地点で測定を行い、このデータを用い、位置と大きさの特定された使用済み燃料プールの場所と、核燃料、および原子炉格納容器の外形形状を 18 度ごとの異なった視点で再構成した結果、核燃料と考えられる重い物質、使用済み燃料プール及び格納容器に対応するイメージを得た。この結果については PTEP 論文（2013 年 7 月）で報告し、さらに 2014 年 1 月に全データ解析の結果を公表するプレスリリースを行い、新聞各紙（朝日、毎日、日経等）で報道された。

2014 年度には、福島第一原子力発電所で、実際に原子炉において炉心融解が起こったときに燃料が溶け落ちていることを想定し、ミューオン透過法検出器を地下に設置し、地中を通った場合でも、物体の位置、密度の見積もりが可能かどうか検証した。2014 年 8 月 25 日から 2014 年 12 月 15 日の間、高エネルギー加速器研究機構の AR 南実験棟に検出器と鉄ブロック標的を図 23 のように、ミューオンが地中を多く通るように設置し、標的の位置、大きさ、種類を変えて測定を行なった。

このデータを用い、通過した物質質量に対するミューオン透過率の依存性を測定した。厚

さ  $x$ , 密度  $\rho$  の物質を通過するミュオンレートの  $N(x)$  は  $\rho x$  の指数関数で減少する場合、吸収係数  $\mu$  を用いて  $N(x) = N_0 \exp(-\mu\rho x)$  と表される。測定結果は図 24 のように、物質質量  $\rho x$  が  $4,000 \text{ kg/m}^2$  (厚さ 2.2 m の土に相当) と  $18,000 \text{ kg/m}^2$  (厚さ 10 m の土に相当) の範囲では、透過率  $N(x)/N_0$  は指数的に減少し、一つの吸収係数  $\mu$  で表されることがわかり、 $\mu = (1.09 \pm 0.04) \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$  が得られた。鉄ブロック標的を、この範囲に置いて測定を行った結果、図 25 に示す通り、鉄ブロック標的を通過するときの、通過した鉄の物質質量に対するミュオン透過率の依存性が得られた。この測定の結果、鉄の比重として  $\rho = 8.3 \pm 1.0 \text{ g/cm}^3$  が得られ、これより 30 日間の測定で鉄の比重を 12% の精度で測定できることを検証した。

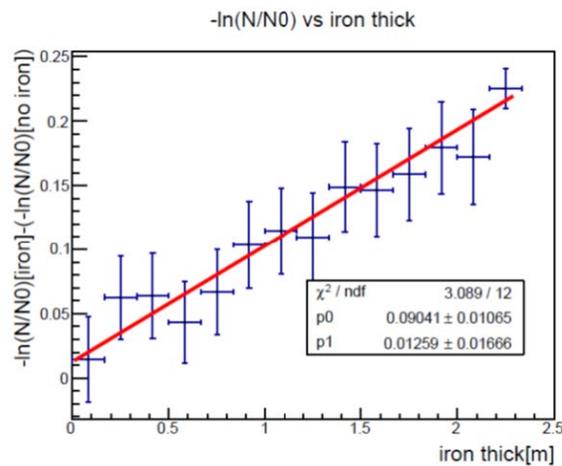


図 25: 鉄ブロック標的を通過するときの、通過した鉄の物質質量に対するミュオン透過率の依存性。

## 【7】 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発」，研究代表者：金 信弘，研究分担者：武内勇司  
14,950 千円（直接経費 11,500 千円，間接経費 3,450 千円）（2014 年度）
2. 科学研究費 基盤研究 (C)「ハドロン衝突における重いクォーク生成の研究」 2013 – 2015 年度，研究代表者：受川 史彦  
1,690 千円（直接経費 1,300 千円，間接経費 390 千円）（2014 年度）
3. 科学研究費 基盤研究 (C)「アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定」 2013 – 2015 年度，研究代表者：原 和彦  
1,174 千円（直接経費 904 千円，間接経費 270 千円）（2014 年度）
4. 科学研究費 新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦」 2011 – 2015 年度  
計画研究 A01：「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」，研究分担者：受川 史彦  
10,000 千円（直接経費：10,000 千円，間接経費：3,000 千円）（2014 年度）
5. 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  
8,190 千円（直接経費 6,300 千円，間接経費 1,890 千円）（2014 年度）
6. 日米科学技術協力事業「ニュートリノ崩壊探索」  
共同研究（日本側参加機関：筑波大物理，宇宙航空研究開発機構，高エネルギー加速器研究機構，岡山大理，理化学研究所，福井大工，近畿大理工  
日本側研究代表者：金 信弘）  
物件費：3,000 千円，旅費：1,000 千円
7. KEK 大学等連携支援事業「筑波大 – KEK 連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて」  
共同代表者：守友 浩，金 信弘，末木啓介  
物件費：650 千円（STJ プロジェクト向け配分額）  
物件費：350 千円（SOI プロジェクト向け配分額）

## 【8】 研究発表

### (1) 原著論文

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Measurement of indirect CP-violating asymmetries in  $D^0 \rightarrow K^+K^-$  and  $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  decays at CDF,”  
Phys. Rev. D **90**, no. 11, 111103 (2014) [arXiv:1410.5435 [hep-ex]].
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurement of the Top-Quark Mass in the All-Hadronic Channel using the full CDF data set,”  
Phys. Rev. D **90**, no. 9, 091101 (2014) [arXiv:1409.4906 [hep-ex]].
  3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section and  $|V_{tb}|$  in Events with One Charged Lepton, Large Missing Transverse Energy, and Jets at CDF,”  
Phys. Rev. Lett. **113**, no. 26, 261804 (2014) [arXiv:1407.4031 [hep-ex]].
  4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurement of the inclusive leptonic asymmetry in top-quark pairs that decay to two charged leptons at CDF,”  
Phys. Rev. Lett. **113**, 042001 (2014) [arXiv:1404.3698 [hep-ex]].
  5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurement of  $B(t \rightarrow Wb)/B(t \rightarrow Wq)$  in Top-Quark-Pair Decays Using Dilepton Events and the Full CDF Run II Data Set,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, no. 22, 221801 (2014) [arXiv:1404.3392 [hep-ex]].
  6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Mass and lifetime measurements of bottom and charm baryons in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072014 (2014) [arXiv:1403.8126 [hep-ex]].
  7. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurements of Direct CP -Violating Asymmetries in Charmless Decays of Bottom Baryons,”  
Phys. Rev. Lett. **113**, no. 24, 242001 (2014) [arXiv:1403.5586 [hep-ex]].
  8. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Measurement of the ZZ production cross section using the full CDF II data set,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 11, 112001 (2014) [arXiv:1403.2300 [hep-ex]].
  9. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Invariant-mass distribution of jet pairs produced in association with a  $W$  boson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV using the full CDF Run II data set,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 9, 092001 (2014) [arXiv:1402.7044 [hep-ex]].
10. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Study of Top-Quark Production and Decays involving a Tau Lepton at CDF and Limits on a Charged-Higgs Boson Contribution,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 9, 091101 (2014) [arXiv:1402.6728 [hep-ex]].
  11. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Observation of s-channel production of single top quarks at the Tevatron,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, 231803 (2014) [arXiv:1402.5126 [hep-ex]].
  12. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Search for  $s$ -Channel Single-Top-Quark Production in Events with Missing Energy Plus Jets in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, no. 23, 231805 (2014) [arXiv:1402.3756 [hep-ex]].
  13. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Indirect measurement of  $\sin^2 \theta_W$  (or  $M_W$ ) using  $\mu^+\mu^-$  pairs from  $\gamma^*/Z$  bosons produced in  $p\bar{p}$  collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072005 (2014) [arXiv:1402.2239 [hep-ex]].
  14. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Evidence for  $s$ -channel Single-Top-Quark Production in Events with one Charged Lepton and two Jets at CDF,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, 231804 (2014) [arXiv:1402.0484 [hep-ex]].
  15. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“First Search for Exotic Z Boson Decays into Photons and Neutral Pions in Hadron Collisions,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, 111803 (2014) [arXiv:1311.3282 [hep-ex]].
  16. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Precise measurement of the  $W$  -boson mass with the Collider Detector at Fermilab,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072003 (2014) [arXiv:1311.0894 [hep-ex]].
  17. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Combination of measurements of the top-quark pair production cross section from the Tevatron Collider,”  
Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072001 (2014) [arXiv:1309.7570 [hep-ex]].

18. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Search for new physics in trilepton events and limits on the associated chargino-neutralino production at CDF,”  
Phys. Rev. D **90**, no. 1, 012011 (2014) [arXiv:1309.7509 [hep-ex]].
19. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
“Study of orbitally excited  $B$  mesons and evidence for a new  $B\pi$  resonance,”  
Phys. Rev. D **90**, no. 1, 012013 (2014) [arXiv:1309.5961 [hep-ex]].
20. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for neutral Higgs bosons of the minimal supersymmetric standard model in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1411**, 056 (2014) [arXiv:1409.6064 [hep-ex]].
21. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for nonpointing and delayed photons in the diphoton and missing transverse momentum final state in 8 TeV  $pp$  collisions at the LHC using the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 112005 (2014) [arXiv:1409.5542 [hep-ex]].
22. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for pair and single production of new heavy quarks that decay to a  $Z$  boson and a third-generation quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1411**, 104 (2014) [arXiv:1409.5500 [hep-ex]].
23. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive  $Z$ -boson production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3195 (2014) [arXiv:1409.3433 [hep-ex]].
24. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of long-range pseudorapidity correlations and azimuthal harmonics in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. C **90**, 044906 (2014) [arXiv:1409.1792 [hep-ex]].
25. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for long-lived neutral particles decaying into lepton jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1411**, 088 (2014) [arXiv:1409.0746 [hep-ex]].
26. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in  $pp$  collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 112015 (2014) [arXiv:1408.7084 [hep-ex]].

27. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “A measurement of the ratio of the production cross sections for  $W$  and  $Z$  bosons  
 in association with jets with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3168 (2014) [arXiv:1408.6510 [hep-ex]].
28. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at  
 $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Nucl. Phys. B **889**, 486 (2014) [arXiv:1408.5778 [hep-ex]].
29. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for the lepton flavor violating decay  $Z \rightarrow e\mu$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV  
 with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 072010 (2014) [arXiv:1408.5774 [hep-ex]].
30. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of flow harmonics with multi-particle cumulants in Pb+Pb collisions  
 at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3157 (2014) [arXiv:1408.4342 [hep-ex]].
31. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Fiducial and differential cross sections of Higgs boson production measured in the  
 four-lepton decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **738**, 234 (2014) [arXiv:1408.3226 [hep-ex]].
32. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new resonances in  $W\gamma$  and  $Z\gamma$  final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV  
 with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **738**, 428 (2014) [arXiv:1407.8150 [hep-ex]].
33. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momen-  
 tum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1409**, 037 (2014) [arXiv:1407.7494 [hep-ex]].
34. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for Scalar Diphoton Resonances in the Mass Range 65 – 600 GeV with the  
 ATLAS Detector in pp Collision Data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, 171801 (2014) [arXiv:1407.6583 [hep-ex]].
35. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurements of jet vetoes and azimuthal decorrelations in dijet events produced  
 in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3117 (2014) [arXiv:1407.5756 [hep-ex]].
36. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the production cross-section of  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+\mu^-) \pi^+\pi^-$  in

*pp* collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV at ATLAS,”  
JHEP **1409**, 79 (2014) [arXiv:1407.5532 [hep-ex]].

37. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3071 (2014) [arXiv:1407.5063 [hep-ex]].
38. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurements of spin correlation in top-antitop quark events from proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 112016 (2014) [arXiv:1407.4314 [hep-ex]].
39. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurements of fiducial and differential cross sections for Higgs boson production in the diphoton decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS,”  
JHEP **1409**, 112 (2014) [arXiv:1407.4222 [hep-ex]].
40. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the muon reconstruction performance of the ATLAS detector using 2011 and 2012 LHC proton-proton collision data,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3130 (2014) [arXiv:1407.3935 [hep-ex]].
41. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of differential production cross-sections for a  $Z$  boson in association with  $b$ -jets in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,”  
JHEP **1410**, 141 (2014) [arXiv:1407.3643 [hep-ex]].
42. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for contact interactions and large extra dimensions in the dilepton channel using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3134 (2014) [arXiv:1407.2410 [hep-ex]].
43. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Flavor tagged time-dependent angular analysis of the  $B_s \rightarrow J/\psi\phi$  decay and extraction of  $\Delta\Gamma$ s and the weak phase  $\phi_s$  in ATLAS,”  
Phys. Rev. D **90**, 052007 (2014) [arXiv:1407.1796 [hep-ex]].
44. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Observation of an Excited  $B_c^\pm$  Meson State with the ATLAS Detector,”  
Phys. Rev. Lett. **113**, 212004 (2014) [arXiv:1407.1032 [hep-ex]].
45. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the cross-section of high transverse momentum vector bosons reconstructed as single jets and studies of jet substructure in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
New J. Phys. **16**, 113013 (2014) [arXiv:1407.0800 [hep-ex]].

46. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for pair-produced third-generation squarks decaying via charm quarks or  
in compressed supersymmetric scenarios in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the  
ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 052008 (2014) [arXiv:1407.0608 [hep-ex]].
47. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for supersymmetry in events with large missing transverse momentum, jets,  
and at least one tau lepton in  $20 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collision data  
with the ATLAS detector,”  
JHEP **1409**, 103 (2014) [arXiv:1407.0603 [hep-ex]].
48. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for strong production of supersymmetric particles in final states with miss-  
ing transverse momentum and at least three  $b$ -jets at  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton  
collisions with the ATLAS detector,”  
JHEP **1410**, 24 (2014) [arXiv:1407.0600 [hep-ex]].
49. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets,  
and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS  
detector,”  
JHEP **1411**, 118 (2014) [arXiv:1407.0583 [hep-ex]].
50. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurements of normalized differential cross sections for  $t\bar{t}$  production in  $pp$  col-  
lisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 072004 (2014) [arXiv:1407.0371 [hep-ex]].
51. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for the direct production of charginos, neutralinos and staus in final states  
with at least two hadronically decaying taus and missing transverse momentum in  
 $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1410**, 96 (2014) [arXiv:1407.0350 [hep-ex]].
52. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Comprehensive measurements of  $t$ -channel single top-quark production cross sec-  
tions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 112006 (2014) [arXiv:1406.7844 [hep-ex]].
53. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“A neural network clustering algorithm for the ATLAS silicon pixel detector,”  
JINST **9**, P09009 (2014) [arXiv:1406.7690 [hep-ex]].
54. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for the Standard Model Higgs boson decay to  $\mu^+\mu^-$  with the ATLAS de-  
tector,”  
Phys. Lett. B **738**, 68 (2014) [arXiv:1406.7663 [hep-ex]].

55. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, 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  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3109 (2014) [arXiv:1406.5375 [hep-ex]].
56. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for  $WZ$  resonances in the fully leptonic channel using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} =$   
8 TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Lett. B **737**, 223 (2014) [arXiv:1406.4456 [hep-ex]].
57. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the Higgs boson mass from the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$   
channels with the ATLAS detector using 25 fb $^{-1}$  of  $pp$  collision data,”  
Phys. Rev. D **90**, 052004 (2014) [arXiv:1406.3827 [hep-ex]].
58. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the  $Z/\gamma^*$  boson transverse momentum distribution in  $pp$  collisions  
at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1409**, 145 (2014) [arXiv:1406.3660 [hep-ex]].
59. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of inclusive jet charged-particle fragmentation functions in Pb+Pb  
collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Lett. B **739**, 320 (2014) [arXiv:1406.2979 [hep-ex]].
60. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for direct pair production of the top squark in all-hadronic final states in  
proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
JHEP **1409**, 015 (2014) [arXiv:1406.1122 [hep-ex]].
61. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the underlying event in jet events from 7 TeV proton-proton col-  
lisions with the ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 2965 (2014) [arXiv:1406.0392 [hep-ex]].
62. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets  
and missing transverse momentum using  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton–proton collision data,”  
JHEP **1409**, 176 (2014) [arXiv:1405.7875 [hep-ex]].
63. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Light-quark and gluon jet discrimination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the  
ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3023 (2014) [arXiv:1405.6583 [hep-ex]].
64. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Evidence for Electroweak Production of  $W^\pm W^\pm jj$  in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV

- with the ATLAS Detector,”  
Phys. Rev. Lett. **113**, 141803 (2014) [arXiv:1405.6241 [hep-ex]].
65. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for supersymmetry in events with four or more leptons in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$   
collisions with the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 052001 (2014) [arXiv:1405.5086 [hep-ex]].
66. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for microscopic black holes and string balls in final states with leptons and  
jets with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
JHEP **1408**, 103 (2014) [arXiv:1405.4254 [hep-ex]].
67. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for high-mass dilepton resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the  
ATLAS detector,”  
Phys. Rev. D **90**, 052005 (2014) [arXiv:1405.4123 [hep-ex]].
68. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the centrality and pseudorapidity dependence of the integrated  
elliptic flow in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 2982 (2014) [arXiv:1405.3936 [hep-ex]].
69. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Monitoring and data quality assessment of the ATLAS liquid argon calorimeter,”  
JINST **9**, P07024 (2014) [arXiv:1405.3768 [hep-ex]].
70. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker,”  
JINST **9**, P08009 (2014) [arXiv:1404.7473 [hep-ex]].
71. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the cross section of high transverse momentum  $Z \rightarrow b\bar{b}$  production  
in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector,”  
Phys. Lett. B **738**, 25 (2014) [arXiv:1404.7042 [hep-ex]].
72. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  production with  $\sqrt{s} = 7$  TeV  $pp$  collisions at ATLAS,”  
JHEP **1407**, 154 (2014) [arXiv:1404.7035 [hep-ex]].
73. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Muon reconstruction efficiency and momentum resolution of the ATLAS experiment  
in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV in 2010,”  
Eur. Phys. J. C **74**, 3034 (2014) [arXiv:1404.4562 [hep-ex]].
74. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for supersymmetry at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in final states with jets and two same-  
sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,”  
JHEP **1406**, 035 (2014) [arXiv:1404.2500 [hep-ex]].

75. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron reconstruction and identification efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2011 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2941 (2014) [arXiv:1404.2240 [hep-ex]].
76. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the low-mass Drell-Yan differential cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 112 (2014) [arXiv:1404.1212 [hep-ex]].
77. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the parity-violating asymmetry parameter  $\alpha_b$  and the helicity amplitudes for the decay  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi + \Lambda^0$  with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **89**, 092009 (2014) [arXiv:1404.1071 [hep-ex]].
78. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with a Z boson and missing transverse momentum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **90**, 012004 (2014) [arXiv:1404.0051 [hep-ex]].
79. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top quark decays  $t \rightarrow qH$  with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  using the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 008 (2014) [arXiv:1403.6293 [hep-ex]].
80. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Four-Lepton Production at the Z Resonance in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 231806 (2014) [arXiv:1403.5657 [hep-ex]].
81. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1405**, 071 (2014) [arXiv:1403.5294 [hep-ex]].
82. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in events with a Z boson,  $b$ -jets and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2883 (2014) [arXiv:1403.5222 [hep-ex]].
83. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top-squark pair production in final states with two leptons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 124 (2014) [arXiv:1403.4853 [hep-ex]].
84. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-plane correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV lead-lead collisions

with the ATLAS detector,”

Phys. Rev. C **90**, 024905 (2014) [arXiv:1403.0489 [hep-ex]].

85. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1404**, 169 (2014) [arXiv:1402.7029 [hep-ex]].
86. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production of a  $W$  boson in association with a charm quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1405**, 068 (2014) [arXiv:1402.6263 [hep-ex]].
87. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The differential production cross section of the  $\phi(1020)$  meson in  $\sqrt{s} = 7$  TeV  $pp$  collisions measured with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **74**, 2895 (2014) [arXiv:1402.6162 [hep-ex]].
88. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Invisible Decays of a Higgs Boson Produced in Association with a  $Z$  Boson in ATLAS,” Phys. Rev. Lett. **112**, 201802 (2014) [arXiv:1402.3244 [hep-ex]].
89. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs boson decays to a photon and a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **732**, 8 (2014) [arXiv:1402.3051 [hep-ex]].
90. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the electroweak production of dijets in association with a  $Z$ -boson and distributions sensitive to vector boson fusion in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” JHEP **1404**, 031 (2014) [arXiv:1401.7610 [hep-ex]].
91. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross section of prompt  $J/\psi$  mesons in association with a  $W^\pm$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1404**, 172 (2014) [arXiv:1401.2831 [hep-ex]].
92. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of dijet cross sections in  $pp$  collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector,” JHEP **1405**, 059 (2014) [arXiv:1312.3524 [hep-ex]].
93. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a multi-Higgs-boson cascade in  $W^+W^-b\bar{b}$  events with the ATLAS de-

- ector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
Phys. Rev. D **89**, 032002 (2014) [arXiv:1312.1956 [hep-ex]].
94. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Standalone vertex finding in the ATLAS muon spectrometer,”  
JINST **9**, P02001 (2014) [arXiv:1311.7070 [physics.ins-det]].
  95. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the top quark pair production charge asymmetry in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
JHEP **1402**, 107 (2014) [arXiv:1311.6724 [hep-ex]].
  96. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for Quantum Black Hole Production in High-Invariant-Mass Lepton + Jet Final States Using  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV and the ATLAS Detector,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, 091804 (2014) [arXiv:1311.2006 [hep-ex]].
  97. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the inclusive isolated prompt photons cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector using  $4.6 \text{ fb}^{-1}$ ,”  
Phys. Rev. D **89**, 052004 (2014) [arXiv:1311.1440 [hep-ex]].
  98. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurement of the mass difference between top and anti-top quarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
Phys. Lett. B **728**, 363 (2014) [arXiv:1310.6527 [hep-ex]].
  99. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for dark matter in events with a hadronically decaying  $W$  or  $Z$  boson and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Rev. Lett. **112**, 041802 (2014) [arXiv:1309.4017 [hep-ex]].
  100. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for new phenomena in photon+jet events collected in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
Phys. Lett. B **728**, 562 (2014) [arXiv:1309.3230 [hep-ex]].
  101. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions using the ATLAS experiment,”  
JHEP **1310**, 130 (2013) [JHEP **1401**, 109 (2014)] [arXiv:1308.1841 [hep-ex]].
  102. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
“Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC,”

Phys. Lett. B **726**, 88 (2013) [Phys. Lett. B **734**, 406 (2014)] [arXiv:1307.1427 [hep-ex]].

103. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of heavy-flavor quarks produced in association with top-quark pairs at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **89**, 072012 (2014) [arXiv:1304.6386 [hep-ex]].
104. K. Motohashi, M. Hagihawa, K. Hara, J. Usui *et al.*, “Evaluation of KEK n-in-p planar pixel sensor structures for very high radiation environments with testbeam”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A765, 125 (2014).
105. Y. Unno, K. Hara, M. Hagihawa *et al.*, “Development of n<sup>+</sup>-in-p large-area silicon microstrip sensors for very high radiation environments - ATLAS12 design and initial results”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A765, 80 (2014).

## (2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 受川史彦：宇宙史国際研究拠点，  
数理物質融合科学センター発足式（2014年9月1日），筑波大学。
2. 萩原睦人：ATLAS 検出器アップグレードに向けたシリコンマイクロストリップセンサーの放射線影響の評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
3. 臼井純哉：ATLAS 実験内部飛跡検出器のアップグレードに向けたプラナーピクセル検出器の性能評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
4. 瀧遼亮：LHC-ATLAS 実験における  $H \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$  崩壊チャンネルでの Heavy Higgs の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
5. 木内健司：LHC-ATLAS 実験における  $b$  クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
6. 大川英希：LHC-ATLAS 実験における  $ZH$  チャンネルを用いたヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
7. 飛田尚志：SOI ピクセル検出器の放射線損傷による回路特性の変動の評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
8. 浅野麻莉：高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。

9. 先崎蓮：ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための SOI-STJ 検出器の研究開発,  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
10. 森内航也：ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発 V,  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
11. 高橋和希：ミューオン透過法による大規模構造体内部撮像に用いるシンチレーター検出器  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
12. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ輻射崩壊探索実験に向けた SOI-STJ 一体型遠赤外光検出器開発,  
第 4 回可視赤外線観測装置技術ワークショップ (2014 年 12 月 3-4 日), 国立天文台三鷹キャンパス.
13. 先崎蓮：R&D status of the cold preamplifier,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
14. 奥平琢也：R&D status of the SOI-STJ detector,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
15. 武政健一:Development of STJ 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 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
16. 受川史彦：素粒子構造部門の研究,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
17. 原和彦：ATLAS 実験検出器,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
18. 大川英希：Selected Highlights from Higgs Results at the LHC-ATLAS Experiment,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
19. 武内勇司：Search for neutrino radiative decay and the status of the far-infrared  
photon detector development,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
20. 金信弘：ニュートリノ物理のための半導体・超伝導複合遠赤外光子検出器,  
第 3 回 CRAVITY シンポジウム (2015 年 3 月 18 日), 産業技術総合研究所.
21. 飛田尚志: SOI ピクセル検出器の放射線損傷による回路特性の変動の評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
22. 萩原睦人: ATLAS 検出器アップグレードに向けたシリコンマイクロストリップセンサーの電荷収集効率の評価  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.

23. 臼井純哉: SLAC の電子ビームを用いた HL-LHC アトラス実験用プラナーピクセル検出器の評価  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
24. 浅野麻莉: 高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
25. 本多俊介: 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
26. 市村龍哉: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発,  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
27. 奥平琢也: ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発 VI,  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
28. 高橋和希: ミューオン透過法による大規模構造体内部撮像に用いるシンチレーター検出器 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.

### (3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. S. Honda *et al.*, “Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
2. K. Kasahara *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Pre-amplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Neutrino Background”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
3. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
4. K. Hara *et al.*, “Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Devices”,  
VERTEX2014, September 15–19, 2014, Macha Lake, The Czech Republic.
5. H. Okawa, “Search for the Higgs Boson Decaying to Dark Matter at the LHC”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.

6. Y. Takeuchi, “Experimental search for the cosmic background neutrino decay in the cosmic far-infrared background”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
7. K. Kiuchi, “Search for the Standard Model Higgs boson decaying to a bottom-quark pair with the ATLAS detector”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
8. T. Okudaira, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector with SOI Preamplifier board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
9. S. Kim, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search”,  
2nd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2014), November 5–8, 2014, Shanghai, China.
10. K. Hara *et al.*, “ Compensation of Radiation Effect in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensor”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2014, November 8–15, 2014, Seattle, USA.
11. K. Takemasa, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector Using Hafnium for Neutrino Decay Search”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2014, November 8–15, 2014, Seattle, USA.
12. K. Nagata, “Beyond-the-Standard-Model Higgs Physics using the ATLAS experiment”,  
10th Latin American Symposium on High Energy Physics (SILFAE), November 24–28, Medellin, Colombia.
13. H. Okawa, “Search for New Physics in the Higgs Sector at the LHC-ATLAS Experiment”,  
Seminar at the University of Science and Technology of China, Hefei, China, March 19, 2015.

#### (4) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. T. Okudaira, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector with SOI Preamplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino”,

IEEE nuclear science symposium and medical imaging conference 2014, Nov. 8–15, 2014, Seattle, USA.

## (5) 会議・研究会報告書

1. S. Honda, K. Hara, K. Tsuchida, M. Asano, N. Tobita, T. Maeda *et al.*,  
“Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors”,  
PoS (TIPP2014) 039, 2014.
2. T. Miyoshi, K. Hara, S. Honda *et al.*,  
“Monolithic pixel detectors fabricated with single and double SOI wafers”,  
PoS (TIPP2014) 044, 2014.
3. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search”,  
PoS (TIPP2014) 155, 2014.
4. K. Kasahara *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino”,  
PoS (TIPP2014) 074, 2014.
5. K. Hara, M. Asano, S. Honda, N. Tobita *et al.*,  
“Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device”,  
PoS (VERTEX2014) 033, 2014.

## (6) 学位論文

### 博士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻，2015年2月。

1. 木内 健司 : Search for the Standard Model Higgs boson decaying to a bottom-quark Pair with the ATLAS Detector (ATLAS 検出器を用いたボトム・クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索)

### 修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻，2015年2月。

1. 市村龍哉 : ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の研究開発
2. 臼井純哉 : HL-LHC での ATLAS 実験に用いる n-on-p 型プラナーピクセルセンサーのテストビームによる性能評価

3. 奥平琢也：ニュートリノ崩壊光探索のためのニオブとアルミニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の開発研究
4. 金丸昌弘：ニュートリノ崩壊探索ロケット実験の設計のためのシミュレーション解析
5. 萩原睦人：HL-LHC 用 ATLAS シリコンマイクロストリップセンサーの陽子照射による放射線耐性の評価
6. 本多俊介：2層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の基礎特性および放射線耐性の研究
7. 本田卓也：ILC 用分割電磁カロリメータのための光検出器 MPPC の応答特性評価
8. 村雨梓：国際リニアコライダー計画に用いるシンチレータ電磁カロリメータのシミュレーションによる性能評価

### **【構成員の異動】**

2014年8月に大川英希が助教として着任。