

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540338

研究課題名(和文)素粒子実験で用いる半導体受光素子の微弱光検出能力の限界を探る

研究課題名(英文)Limits of the abilities for feeble light detection of the semiconductor photosensors used in elementary particle experiments

研究代表者

吉田 拓生 (Yoshida, Takuo)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30220651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子実験用の粒子検出器の中には、荷電粒子が物質中を通過するときに生じるシンチレーション光のような極めて微弱な光信号を捉えることによって粒子を検出するものがある。本研究では、アバランシェフォトダイオードやマルチピクセルフォトンカウンター(MPPC)など、粒子検出器の受光素子の候補となり得る半導体受光素子の微弱光検出能力を評価する実験を行った結果、MPPCが最も高感度であることが分かった。特に、MPPCを-40程度まで冷却することによって、従来用いられてきた光電子増倍管などでは検出効率が著しく低下する光子7個程度の極めて微弱な光信号に対しても、100%近い検出効率が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Some of particle detectors used in elementary particle experiments detect particles by sensing feeble light such as scintillation light generated by charged particles passing through matter. We carried out the experiments to evaluate the abilities for feeble light detection of some semiconductor photosensors including avalanche photodiodes and multi-pixel photon counters(MPPCs) selected as photosensor candidates for the particle detectors. As a result, we found that the MPPC was the most sensitive. In particular, the MPPC cooled down to -40 degrees centigrade could detect with almost 100% efficiency the quite feeble light pulse which contained only 7 photons. The photomultiplier tubes, which have usually been used in particle detectors, can never achieve such high detection efficiency for such a feeble light pulse.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：素粒子実験 半導体受光素子 APD MPPC シンチレーション光 チェレンコフ光

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の実験を行うための測定装置には、高エネルギー粒子ビームの衝突反応によって生成される種々の娘粒子の飛跡を検出したり、運動量やエネルギーなどを測定したり、粒子の種類を同定したりするための様々な素粒子検出器が組み込まれている。このような素粒子検出器の中には、荷電粒子が物質を通過するときに生じるシンチレーション光やチェレンコフ光のような微弱な光信号を捉えることによって粒子を検出するものがある。例えば、ホドスコープやTOFカウンター、シンチレーティングファイバー荷電粒子飛跡検出器、カロリメーター、チェレンコフカウンターなどである。このような素粒子検出器では、より微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定することが、検出効率や測定精度の向上につながる。

### 2. 研究の目的

従来、素粒子を検出するためのこのような微弱な光信号は、光電子増倍管(PMT)などの電子管式受光素子を用いて計測するのが通例となってきたが、本研究の目的は、そのような受光素子の代わりに半導体受光素子の一種であるアバランシェフォトダイオード(APD)やマルチピクセル・フォトンカウンター(MPPC)を用いて、光電子増倍管(PMT)などでは検出効率が著しく低下するような極めて微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定する方法を確立することである。特に、本研究では、平均光子数10個以下の極めて微弱な光パルスを上述の半導体受光素子で検出する実験を行い、どのくらい微弱な光信号まで100%に近い検出効率で検出でき、その光量を精度よく測定することができるか、その能力の限界を系統的に調べた。

### 3. 研究の方法

#### (1)微弱パルス光源の開発

本研究では、光パルス中の平均光子数を0~数十個の範囲の任意の値に設定することができる微弱パルス光源が必要となる。しかも、その光パルスの時間幅は、実際の素粒子検出器の光信号に合わせて、数十 ns 以下であることが望ましい。そこで、発光ダイオード(LED)に時間幅30ns程度の高速度パルス電圧を印加する方式の微弱パルス光源を開発した。パルス当たりの平均光子数は、LEDに印加するパルス電圧の大きさとLEDの光を減光するためのNDフィルターによって調節することができるようにした。

このパルス光源で受光素子の性能評価を行う際には、想定する素粒子検出器の発光スペクトルや受光素子で高い量子効率を得られる波長領域に合致する色のLEDを選択する必要がある。本研究では、カナダ Lumi leds社製の3種類のLED(型式:HPWN-MB00、HPWN-MC00、HPWN-MG00)を必要に応じて使い

分けることにした。各LEDに対して実測した発光スペクトルを図1に示す。それぞれ青、青緑、緑のLEDであるが、これらはそれぞれ青色プラスチックシンチレータ(発光波長400~500nm、ピーク波長430nm付近)、青色シンチレーティングタイルの発光を外に引き出すための波長変換材Y-11入り光ファイバー(発光波長480~550nm、ピーク波長500nm付近)蛍光材として3HFを使用したプラスチックシンチレータ(発光波長500~600nm、ピーク波長530nm付近)の発光スペクトルに近いLEDとして選択した。

受光素子の性能評価を行う際には、光源から受光素子まで外径0.75mmの透明プラスチック光ファイバーで光パルスを伝送した。

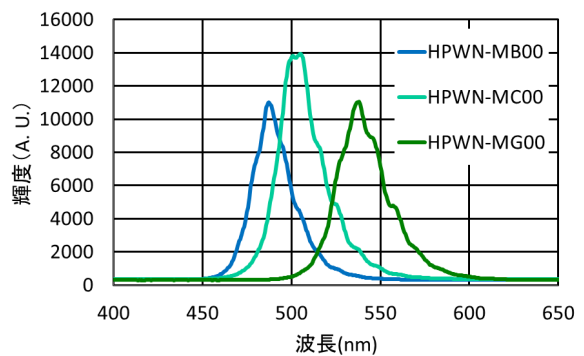


図1 光源として用いたLEDの発光スペクトル

#### (2)素粒子検出器の受光素子に関する考察

一般に、微弱な光信号を検出する装置は、最初に受光面のところで光電効果によって光子を電子(光電子)に変換し、その光電子を増倍させ、電気信号として取り出す仕組みになっている。入射する光信号が、例えば光子の数でせいぜい数個程度しかないほど微弱である場合、最初に光子を電子に変換する際の効率(量子効率)が、受光素子を選択する上で本質的に重要なパラメーターとなる。もし量子効率が低く、光電子がひとつも得られなければ、そのあとの光電子増倍率がいくら大きくても信号は出てこないからである。光電子増倍管は、光電子増倍率が極めて大きく(100万倍程度)、ノイズも小さいという長所があるものの、量子効率がせいぜい25%程度しかないため、100%近い効率で光信号を検出するためには、信号毎の入射光子数が平均値のまわりにポアソン分布することを考慮すると、信号当たり平均十数個以上の光子が必要となる。そこで、本研究では、光電子増倍管の代わりに、APDやMPPCなど、70~95%に亘る高い量子効率を持つ半導体受光素子に着目し、微弱光検出能力の向上を図る。

#### (3)APDの選択

半導体受光素子の一種であるAPDは、通常のフォトダイオードと違って、入射光によってたたき出された光電子を素子内で増倍させることができ、このため、入射光が微弱で

も大きな電気信号を出力することができる。APD には、暗電流によるショット雑音や光電子増倍率の揺らぎに起因する過剰雑音などの影響で微弱光の検出効率が低下するという欠点があるが、この内、ショット雑音は APD を冷却することによって低減させることができる。

本研究では、素粒子検出器に適していると考えられる以下の 2 種類の APD を選択した。

浜松ホトニクス社製 APD S8664-55

これは、欧州 CERN の無機結晶  $PbWO_4$  を用いた電磁力ロリメーターのために開発された APD である。青色から赤色にわたる広い範囲の波長域で 80% 以上の量子効率を持つ。逆バイアス電圧をかけたときに pn 接合面付近にできる空乏層が厚いため、受光面の面積が  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  と大きい割には静電容量が小さく (80pF)、ノイズを比較的強く抑えることができる。通常のシンチレーションカウンターやカロリメーターなど、受光面の大きい APD を必要とする検出器に適している。

浜松ホトニクス社製 APD S5343mod

これはシンチレーションファイバー (Sci-Fi) 荷電粒子飛跡検出器用に開発された特注の APD で、受光面は直径 1mm の円形である(引用文献)。量子効率は、3HF 型 Sci-Fi の発光波長域 (500 ~ 600nm、緑色) で 94% に達する。波長 450nm 付近 (青色) でも 80% 以上の量子効率を持つ。

#### (4)MPPC の選択

MPPC も APD と同様に半導体受光素子の一種であるが、1 つの MPPC 素子の中に小さい APD ピクセルが密に集積されており、その APD ピクセルをガイガーモードで動作させるため、通常の APD よりも大きな信号が得られる。また、ガイガーモードで動作させることにより、1 つのピクセルに何個光子が入射しても同じ大きさの信号が出て来るが、入射光が微弱で、1 つのピクセルに複数の光子が入射する確率が極めて低い場合には、信号を出しているピクセルの数が、検出した光子の数、すなわち光電子数となる。1 つの MPPC からは全ての APD ピクセルの出力を加算した信号が出力されるので、その波高から信号を出したピクセルの数が分かる。しかし、MPPC も半導体受光素子であるが故に、ノイズの発生頻度 (ダークカウント) が高いという欠点を持つ。本研究では、MPPC に対しても APD と同様、冷却することによってノイズを極力低減させる。

本研究では、浜松ホトニクス社製の MPPC S10362-11-100C を選択した。この MPPC では、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  の受光面の中に  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  の APD ピクセルが 100 個集積されている。通常、MPPC の表面は保護用の透明の樹脂で覆われていて、その樹脂の表面での反射によって入射光が数%ほど失われるが、本研究では、この樹脂の無い MPPC を特別に作製してもらっ

た。その影響もあって、量子効率は、青色プラスチックシンチレーターの発光波長域 (400 ~ 500nm) で 70 ~ 75% に達する。なお、MPPC では隣接するピクセルの境界付近に若干の不感領域ができるため、(ピクセル当たりの量子効率)  $\times$  (受光面全体に占める有感領域の割合) を MPPC の量子効率と定義する。

#### (5) APD や MPPC の微弱光検出能力を評価するための実験

本研究では、上述の微弱パルス光源を用いて、選択した APD や MPPC の微弱光検出能力の限界を探る実験を行い、これまで一般的に用いられてきた光電子増倍管による結果と比較した。APD や MPPC は冷却する必要があるため、真空容器の中に設置し、ペルチエ素子を用いて -40 まで冷却できるようにした。光パルス伝送用の透明の光ファイバーは、真空容器の亚克力窓に開けた小穴を通して容器内に挿入し、挿入後、真空漏れを防ぐために小穴の隙間を接着剤で塞いだ。

### 4. 研究成果

#### (1) PMT による微弱パルス光源のテスト

はじめに、光電子増倍管 (PMT、浜松ホトニクス H6520) を用いて、本研究の中で開発した微弱パルス光源の発光量を測定し、本研究で必要とする微弱な光パルスが得られることを確認した。図 2 は、発光ピーク波長 500nm の LED (HPWN-MC00) を用いたときの結果である。横軸は、PMT に入射した光パルスがその受光面からたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、この値を PMT の量子効率 (500nm の光に対して 0.2) で割れば、パルス当たりの平均入射光子数が得られる。また、縦軸は、この光源の光パルスを PMT で検出したときの検出効率を測定した結果であるが、この検出効率は、光電子数にポアソン分布を仮定したときの予測値 (赤の曲線) と一致している。

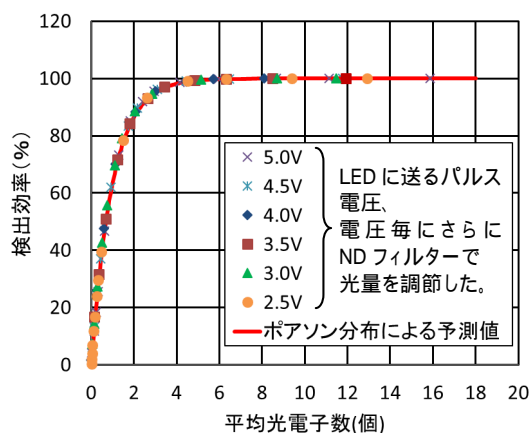


図 2 PMT による微弱パルス光源のテスト結果

図 2 の結果から、この光源には次のような特性があることが分かる。

パルス当たりの平均光子数を 0 ~ 数十個の

範囲の任意の値に設定することができる。

パルス毎の光子数が、理論どおり、設定した平均値のまわりにポアソン分布する。

本研究では 97%以上の検出効率があれば「100%近い検出効率」が得られたものとみなすことにして、そのために必要な平均光電子数を求めることにすると、図2の測定結果から、このPMTでは平均光電子数が3.5個あればその要件を満たすことが分かる。このPMTの量子効率、波長400nm付近で最も大きい23%、波長500nmで12%、530nm付近で8%であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が3.5個となるためには、平均入射光子数が15.2個、29.2個、43.8個必要となる。なお、PMTの検出効率には温度依存性はほとんどないことが知られているので、本研究では、PMTは常に室温中に置いた。

### (2)APDの微弱光検出能力

APD S8664-55とS5343modの検出効率の測定結果をそれぞれ図3、図4に示す。光源のLEDには、APDが最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、HPWN-MG00を選択した。横軸は、APDに入射した光パルスがたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、測定したAPDの出力信号から求めた。温度毎の測定点をつなぐ曲線は、ポアソン分布による予測値ではなく、単なるスプライン曲線である。

APDで微弱な光信号を検出する場合、暗電流によるショット雑音の影響で、信号とノイ

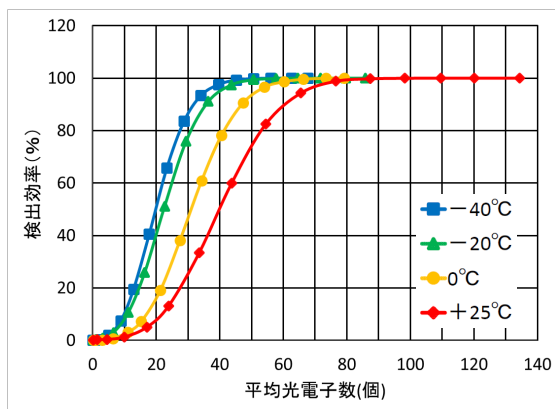


図3 APD S8664-55の検出効率

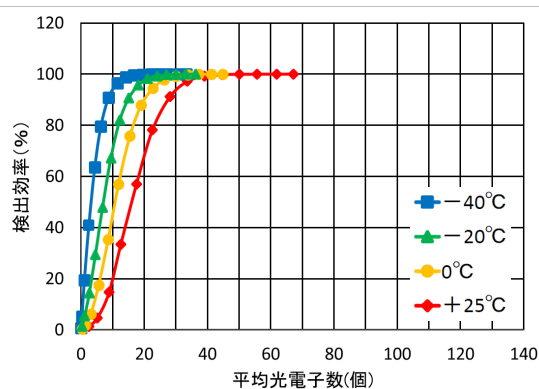


図4 APD S5343modの検出効率

ズを区別するためのしきい値を高く設定する必要があり、光電子増倍率や入射光の波長に応じて増加する過剰雑音の影響で、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの1.5~2.5倍に拡大されることなどから、100%近い検出効率を得るために必要となる平均光電子数は、PMTなど、そのような雑音のほとんどない受光素子を用いたときよりも大きくなる。しかし、APDを冷却することにより、ショット雑音の原因となる暗電が減り、微弱光検出能力を向上させることができる。また、暗電流はAPDの受光面の面積に比例して大きくなることから、受光面の大きいS8664-55よりも、受光面の小さいS5343modの方が有利である。

図3、図4に示す結果の中で最も高性能であったのは、-40℃に冷却したS5343modで、光電子が12.0個あれば97%以上の検出効率を達成することができる。前述のPMTに比べると大きな値であるが、このAPDの量子効率が波長400nm付近で61%、波長500nm付近で91%、波長530nm付近で最も大きい94%であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が12.0個となるためには、平均入射光子数が19.7個、13.2個、12.8個あればよく、波長500nm付近の幅広い波長領域でAPDの微弱光検出能力がPMTを上回ることになる。ただし、このときのAPDの光電子増倍率は約1200倍で、APDにしては大きく、その過剰雑音の影響により、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの2.5倍ほどに大きくなってしまい、入射した光信号毎の光子数、すなわち入射光量を測定する精度は、PMTよりも悪くなる。

### (3)MPPCの微弱光検出能力

MPPC S10362-11-100Cの検出効率の測定結果を図5に示す。光源のLEDには、MPPCが最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、HPWN-MB00を選択した。横軸の平均光電子数は、信号を出すピクセル数の平均値で、測定したMPPCの出力信号から求めた。ここでも温度毎の測定点をつなぐ曲線は、単なるスプライン曲線である。

APDと同様、MPPCもノイズが多いので、信

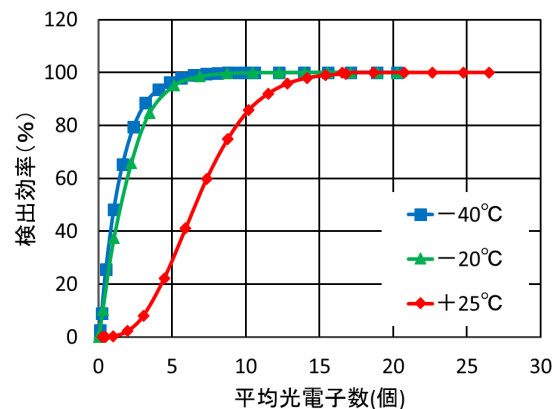


図5 MPPC S10362-11-100Cの検出効率

号に対するしきい値を高く設定しないとノイズと信号を区別することができないが、冷却によってノイズを低減させれば、微弱光検出能力を向上させることができる。図5の結果によると、このMPPCを-40℃まで冷却すれば、97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を5.2個まで減らすことができる。このMPPCの量子効率が波長400nm付近で72%、波長450nm付近で最も大きい75%、波長500nm付近で69%、波長530nm付近で62%であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が5.2個となるためには、平均入射光子数が7.2個、6.9個、7.5個、8.4個あればよく、波長400nmから500nm付近の幅広い波長領域でMPPCの微弱光検出能力がPMTやAPDを上回る。

#### (4)まとめと今後の課題

素粒子検出器の発光波長は、検出器の中で用いる発光体の種類によって様々であるが、3の(1)で述べたように、シンチレーターやその波長変換材を用いる場合は、400~600nmの範囲に収まる。また、チェレンコフ光を利用する場合には、もう少し短い波長まで検出することが望ましい。

本研究では、着目した受光素子毎に、微弱な光信号に対して97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を測定したが、この平均光電子数を各受光素子の量子効率で割れば、各受光素子に入射する光信号中の平均入射光子数を求めることができる。ただし、受光素子の量子効率は入射光の波長の関数となるので、平均入射光子数も、図6に示すように、波長の関数となる。なお、本研究では、量子効率は、受光素子の製造元が提供する資料やカタログに記載されている量子効率のデータから引用した。

図6から分かるように、波長350nmから600nmに亘る領域で最も微弱光検出能力が高かったのは、-40℃のMPPCである。このMPPC

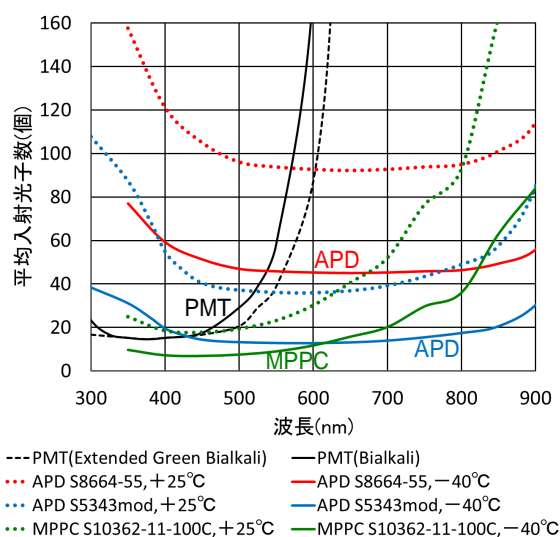


図6 各受光素子で97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均入射光子数

は、入射する光信号中に平均7~8個の光子があれば、確実に検出することができる。また、波長の比較的長い500~600nm付近では、-40℃のAPD S5343mod(受光面1mm)もMPPCに匹敵する高い検出能力を示す。ただし、受光面が大きい方のAPD S8664-55(受光面5mm×5mm)は、それだけノイズも大きくなるため、-40℃まで冷却しても、50個近い数の光子が入射しないと、十分な検出効率が得られない。一方、波長の比較的短い400~500nm付近では、光電子増倍管(PMT)と-40℃のAPD S5343modは、ほぼ同等の性能を示す。特に、受光面がExtended Green BialkaliでできたPMTは、通常のBialkaliのPMTに比べて、波長450nm以上の領域で感度が低下しにくくなっている。

以上のように、本研究で調べた受光素子の中ではMPPCが最も高感度であったが、このMPPCの受光面は1mm×1mmの正方形で、APD S5343modの受光面と同様に小さい。今後の課題として、もっと大きな受光面を持つMPPCについても性能評価を行う必要がある。また、本研究ではAPD、MPPCとも-40℃まで冷却したが、さらに低い温度まで冷却したときの性能評価も行いたい。

#### <引用文献>

T. Yoshida, T. Sora, A prototype avalanche photodiode array for scintillating fiber tracking detector, Nucl. Instr. and Meth. A534 (2004) 397-402.

#### 5. 主な発表論文等

##### (雑誌論文)(計7件)

T. Aaltonen, S.H. Kim, Y. Seiya, D. Toback, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他395名, 398番目, Search for Resonances Decaying to Top and Bottom Quarks with the CDF Experiment, Phys. Rev. Lett., 査読有, 115巻, 6号, 2015, pp.061801-1~8,

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.061801>

T. Aaltonen, S.H. Kim, Y. Seiya, D. Toback, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他395名, 396番目, Constraints on Models of the Higgs Boson with Exotic Spin and Parity using Decays to Bottom-Antibottom Quarks in the Full CDF Data Set, Phys. Rev. Lett., 査読有, 114巻, 14号, 2015, pp.141802-1~9,

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.141802>

T. Aaltonen, S.H. Kim, Y. Seiya, D. Toback, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他760名, 752番目, Observation of s-Channel Production of Single Top

Quarks at the Tevatron, Phys. Rev. Lett., 査読有、112 巻、23 号、2014、pp.231803-1 ~ 11、  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.231803>

T. Aaltonen, S.H. Kim, Y. Seiya, D. Toback, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他 401 名、402 番目、Study of top-quark production and decays involving a tau lepton at CDF and limits on a charged Higgs boson contribution, Phys. Rev. D、査読有、89 巻、9 号、2014、pp.091101-1 ~ 9、  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.091101>

T. Aaltonen, S.H. Kim, L. Ristori, Y. Seiya, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他 403 名、404 番目、Combination of searches for the Higgs boson using the full CDF data set, Phys. Rev. D、査読有、88 巻、5 号、2013、pp.052013-1 ~ 26、  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.052013>

T. Aaltonen, S.H. Kim, I. Nakano, L. Ristori, Y. Seiya, F. Ukegawa, C. Vellidis, T. Yoshida, 他 466 名、466 番目、Precision Top-Quark Mass Measurements at CDF, Phys. Rev. Lett., 査読有、109 巻、15 号、2012、pp.152003-1 ~ 8、  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.152003>

T. Aaltonen, S.H. Kim, G. Punzi, R. Roser, Y. Seiya, F. Ukegawa, T. Yoshida, 他 505 名、505 番目、Top-quark Mass Measurement Using Events with Missing Transverse Energy and Jets at CDF, Phys. Rev. Lett., 査読有、107 巻、23 号、2011、pp. 232002-1 ~ 8、  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.232002>

〔学会発表〕(計 10 件)

田後佑典、小川祐生、吉田拓生、BGO ファイバーの線エネルギー分解能向上のための研究、2015 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2015 年 11 月 28 日、金沢大学

折笠桂輔、図師太一、吉田拓生、素粒子実験で用いる受光素子の微弱光検出能力の研究、2014 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2014 年 12 月 13 日、福井大学

図師太一、折笠桂輔、吉田拓生、素粒子実験に用いる APD の微弱光に対する検出効率向上の研究、2014 年度日本物理学会北陸支

部定例学術講演会、2014 年 12 月 13 日、福井大学

行方 彩、吉田拓生、シンチレーションカウンターの代替となるチェレンコフカウンターの検出効率、2013 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2013 年 11 月 23 日、富山大学

田中里依、永島幹也、吉田拓生、MPPC バイアス電圧自動温度補償システムの開発、2012 年度日本物理学会北陸支部 定例学術講演会、2012 年 12 月 1 日、金沢大学

永島幹也、小森亮太、田中里依、服部智也、前川貴昭、吉田拓生、微弱シンチレーション光の読み出しに用いる MPPC の温度特性、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学

清水佑亮、井上博貴、小村祥太、吉田拓生、素粒子実験で用いるアバランシェフォトダイオードの過剰雑音の研究、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 13 日、京都産業大学

梶 瑞季、竹生裕香、吉田拓生、シンチレーションカウンターの代替となるチェレンコフカウンターの開発、2011 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、平成 23 年 11 月 26 日、福井大学

清水佑亮、小村祥太、井上博貴、吉田拓生、カロリメーターで用いる APD の過剰雑音の研究、2011 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、平成 23 年 11 月 26 日、福井大学

小森亮太、永島幹也、服部智也、吉田拓生、シンチレーティングファイバーの読み出しに用いる MPPC の温度特性、2011 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、平成 23 年 11 月 26 日、福井大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://apphy.u-fukui.ac.jp/~yoshida/main.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 拓生 (Takuo Yoshida)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30220651

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし