

CTA報告186： CTA大口徑望遠鏡のための SiPMカメラの開発

橋山和明^A, 猪目祐介^A, 岩村由樹^A, 大岡秀行^A, 岡知彦^B, 岡崎奈緒^A, 奥村暁^{C, D}, 折戸玲子^E, 片桐秀明^F,
櫛田淳子^G, 窪秀利^B, 郡司修一^H, 齋藤隆之^A, 櫻井駿介^A, 佐々木寅旭^I, 砂田裕志^I, 高橋光成^A, 立石大^I,
田中真伸^J, 手嶋政廣^{A, K}, 寺内健太^B, 寺田幸功^I, 門叶冬樹^H, 中森健之^H, 西嶋恭司^G, 野上優人^F, 野崎誠也^B,
野田浩司^A, Daniel Mazin^{A, K}, Daniela Hadasch^A, 山本常夏^L, 吉田龍生^F,
他 CTA-Japan consortium

東大宇宙線研^A, 京大理^B, 名大ISEE^C, 名大KMID^D, 徳島大理工^E, 茨城大理^F, 東海大理^G, 山形大理^H,
埼玉大理^I, KEK素核研^J, マックスプランク物理^K, 甲南大理工^L



日本物理学会 第76回年次大会 2021/9/14



• 解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT)

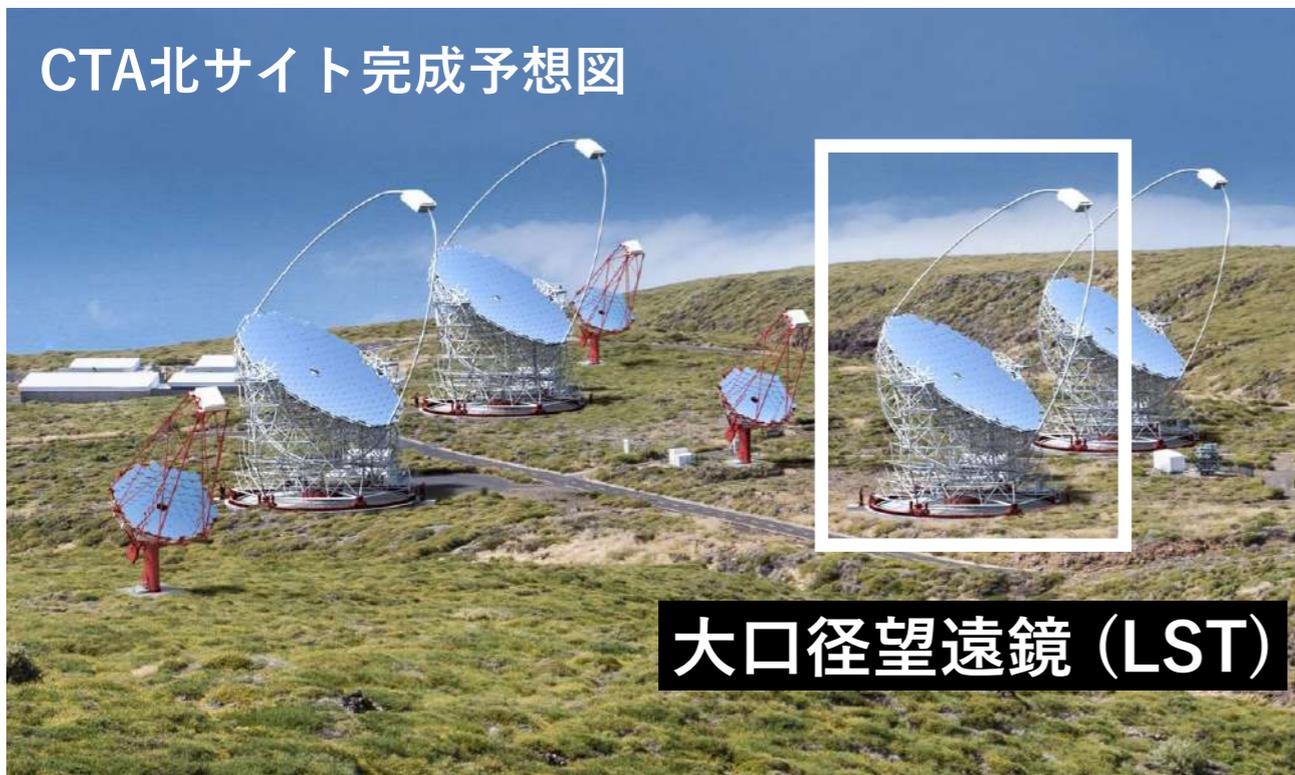
- ガンマ線と地球大気との相互作用の過程で生じるチェレンコフ光を観測
 - ✓ 焦点面光検出器 (カメラ) で撮像し, ガンマ線の間接観測を行う
 - ✓ 感度はガンマ線とハドロンの弁別性能にも依存する
 - ➔ ピクセルの細分化によって弁別性能が向上 = **LSTの感度向上**

• CTA大口徑望遠鏡 (LST)

- CTAの中で口径が最大の望遠鏡
- カメラは1855本の光電子増倍管 (PMT) で構成される
 - ➔ カメラ素子をPMTから**SiPM**に変える



Credit: G. Pérez, IAC, SMM



Credit: Gabriel Pérez Díaz. IAC.



Credit: Akira Okumura

• Silicon Photo-Multiplier (SiPM)

- 複数のガイガーモードアバランシェフォトダイオード (GAPD) で構成
- 光子検出メカニズム:
 - ✓ 光電効果で生じた光電子がアバランシェ増倍によって増倍される

SiPMのメリット

- ✓ QEがPMTの約1.5倍
→ 約60% @300-500 nm
- ✓ 動作電圧が低い
→ 約40 V
- ✓ ピクセルの細分化が可能

など

SiPMのデメリット

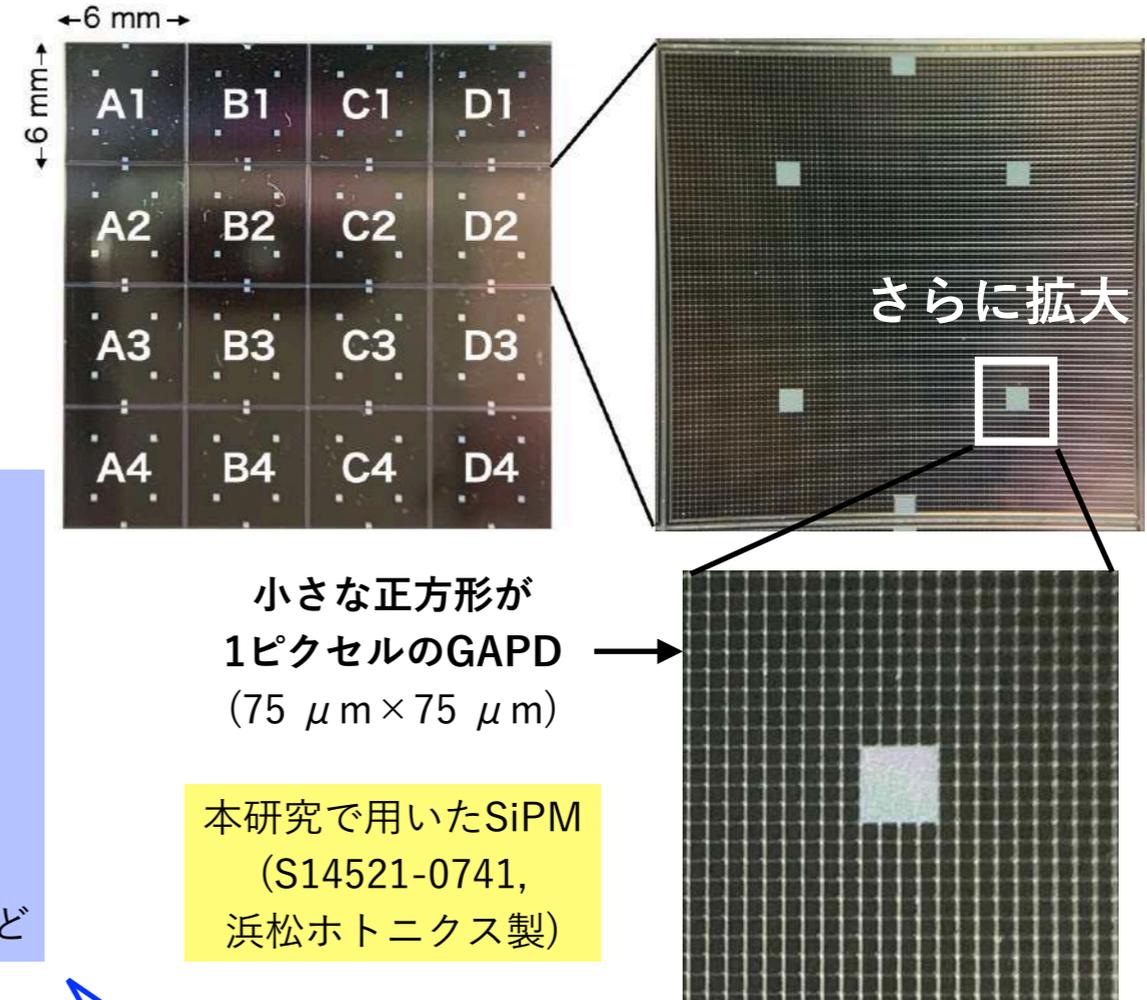
- ✓ 信号のFWHMが大きい
- ✓ オプティカルクロストーク (OCT) の発生確率が高い
- ✓ 信号の読み出しチャンネルが増加する

など

PMTとSiPMの定量的な性能の比較が重要

- ▶ 信号幅やOCTなどのSiPM特有のデメリットを加味してもPMTに劣らないかを検証する必要がある

本研究の目的



オプティカルクロストーク (OCT)

- 光検出と同時にSiPM自体が赤外線光子を発生させる現象
- 1光子を複数光電子と見誤ってしまう

(1) 光電子増倍率 (ゲイン)

- 印加電圧と電荷の関係を調べる

(2) 降伏電圧

- アバランシェ増倍を起こし始める電圧
- ゲインの超過電圧依存性から推定する
 - ✓ 超過電圧 = 印加電圧 - 降伏電圧

(1), (2) はSiPMの動作確認として行う

(3) 信号の波形整形

- **波形整形回路により~3 nsのパルス幅を目指す**
- SiPMの出力波形はそのままではLSTに不適
 - ✓ 素早い立ち上がりの後, 数百nsで減衰
 - ✓ チェレンコフ光と夜光を弁別不可

(4) 電荷分解能

- **1 p.e.の電荷分布の揺らぎとして定義**
 - ✓ 高電荷分解能は検出光子数の推定値の統計誤差を減らす

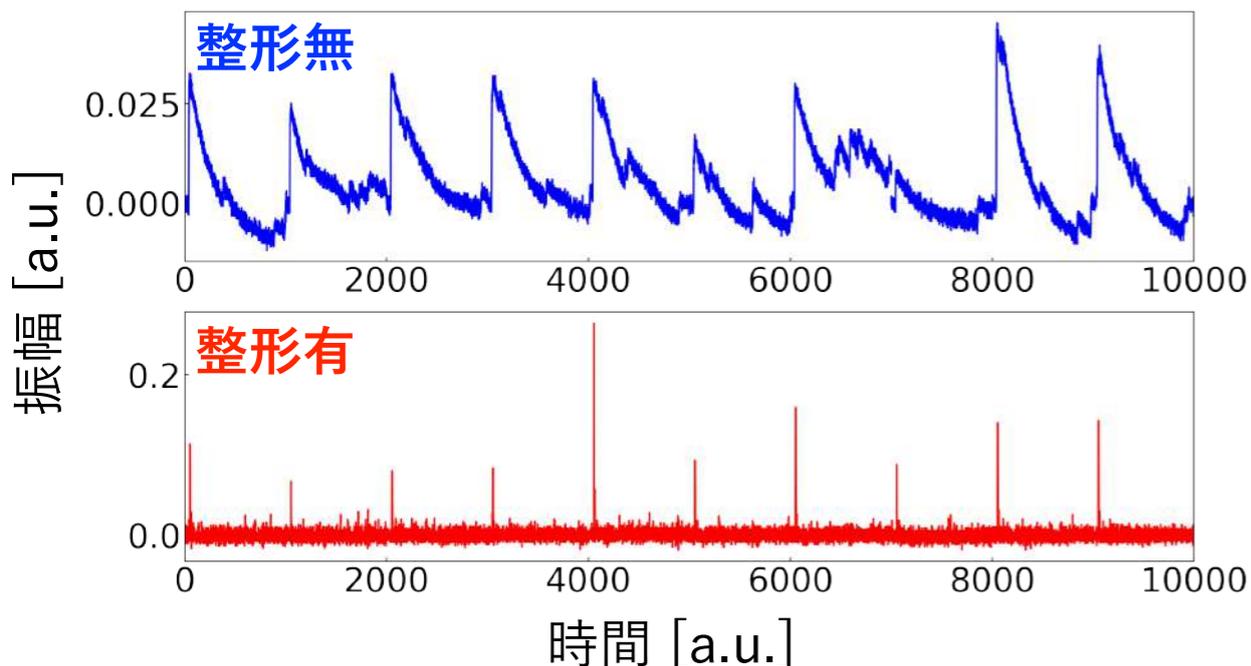
(5) OCT

- **OCTの超過電圧依存性を調べる**
 - ✓ 検出光子数の分布がポアソン分布からずれるため, 電荷分解能を補正する必要がある

(6) 信号合成

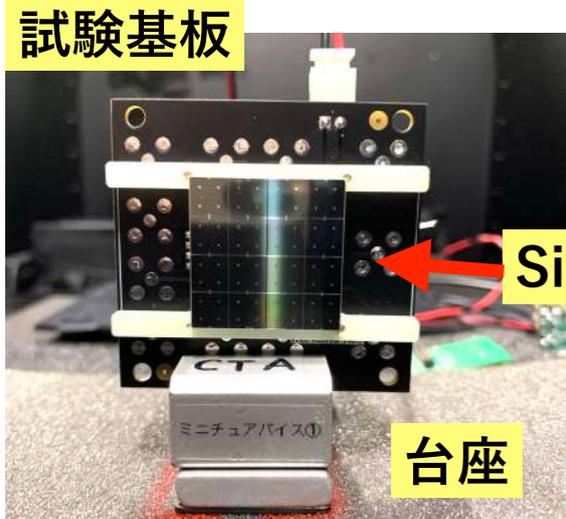
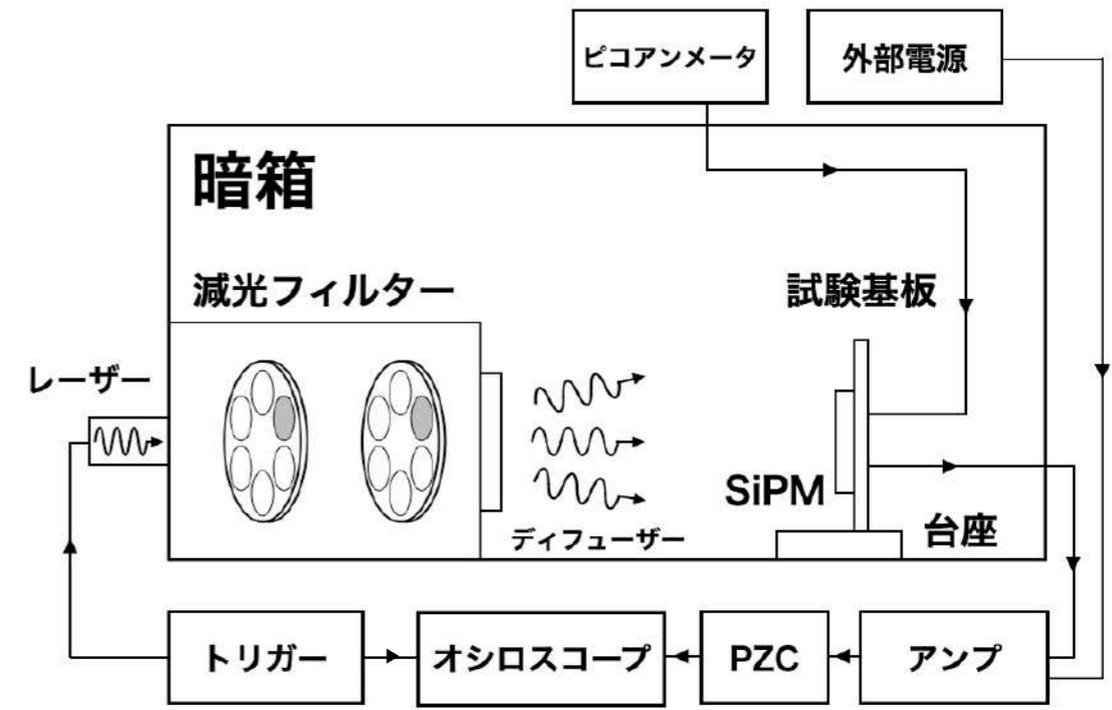
- **信号合成時の電荷分解能を評価する**
- SiPMは素子サイズが小さい
 - ✓ PMTカメラの1画素をカバーできない
 - ✓ 信号合成により1画素分の信号にする必要がある

カメラ素子のSiPM化の研究において 特に重要な測定項目



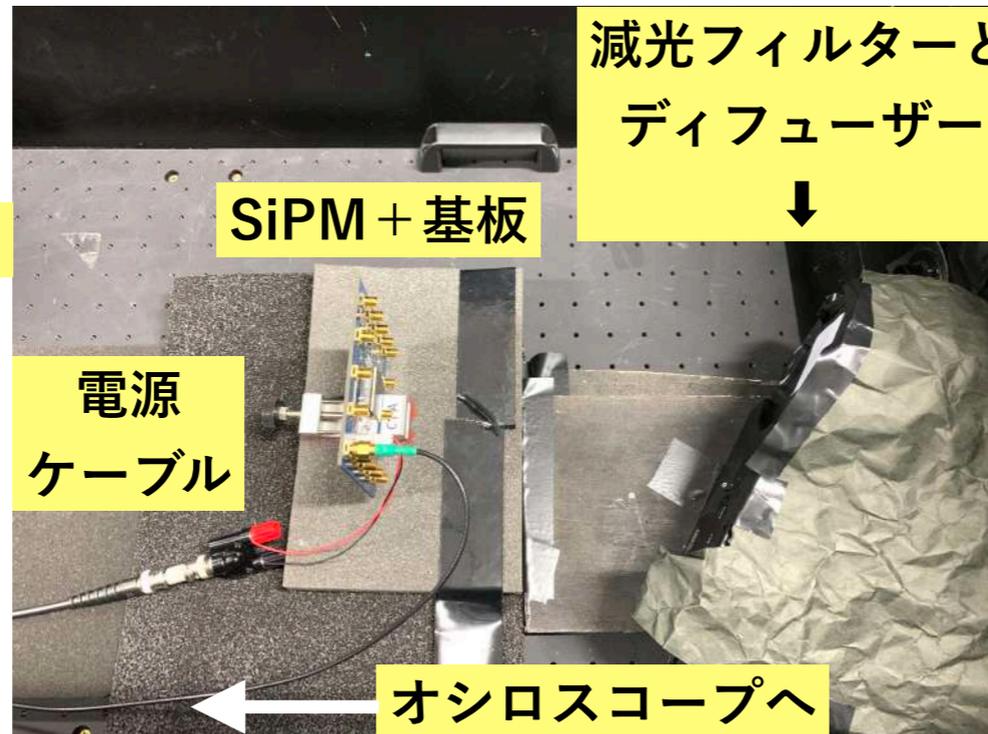
測定系

- 試験基板
 - ✓ SiPMの信号を読み出すための基板
 - ✓ 1チャンネル読み出し, 2チャンネルおよび4チャンネルでの信号合成が可能
- 他の外部回路
 - ✓ 波形整形回路 → Pole Zero Cancellation (PZC)
 - ✓ 増幅回路 → アンプ (OPA855DSGEVM, 27倍増幅)



基板とSiPM

暗箱内

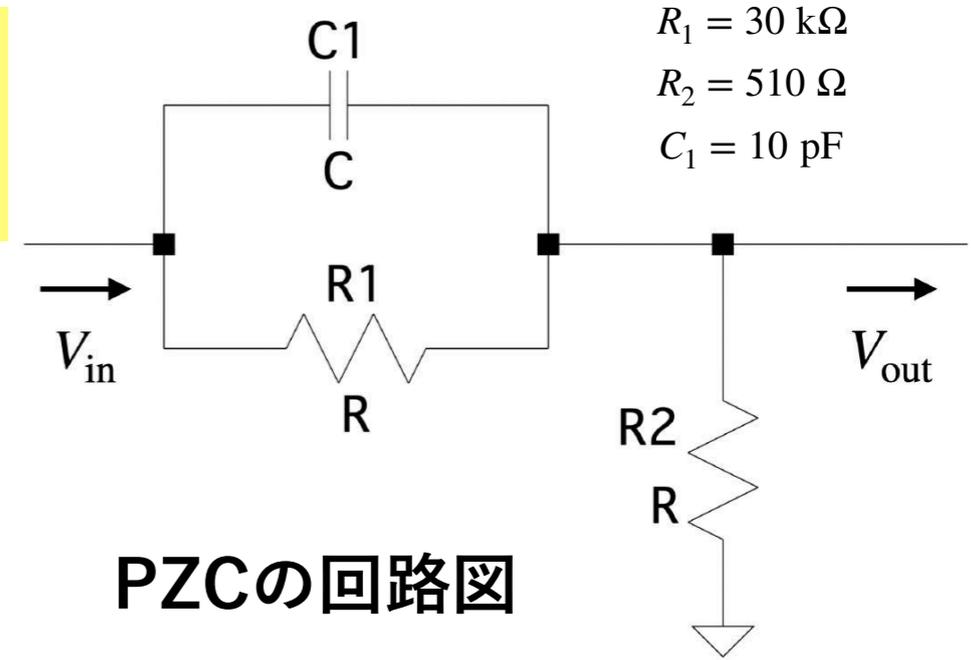


減光フィルターとディフューザー

SiPM + 基板

電源ケーブル

オシロスコープへ



PZCの回路図

(1) ゲインの電圧依存性

- 約39.5 V以上でゲインは1次の関係となった
- 42.0 Vでのゲインは $(2.33 \pm 0.10) \times 10^5$ となった

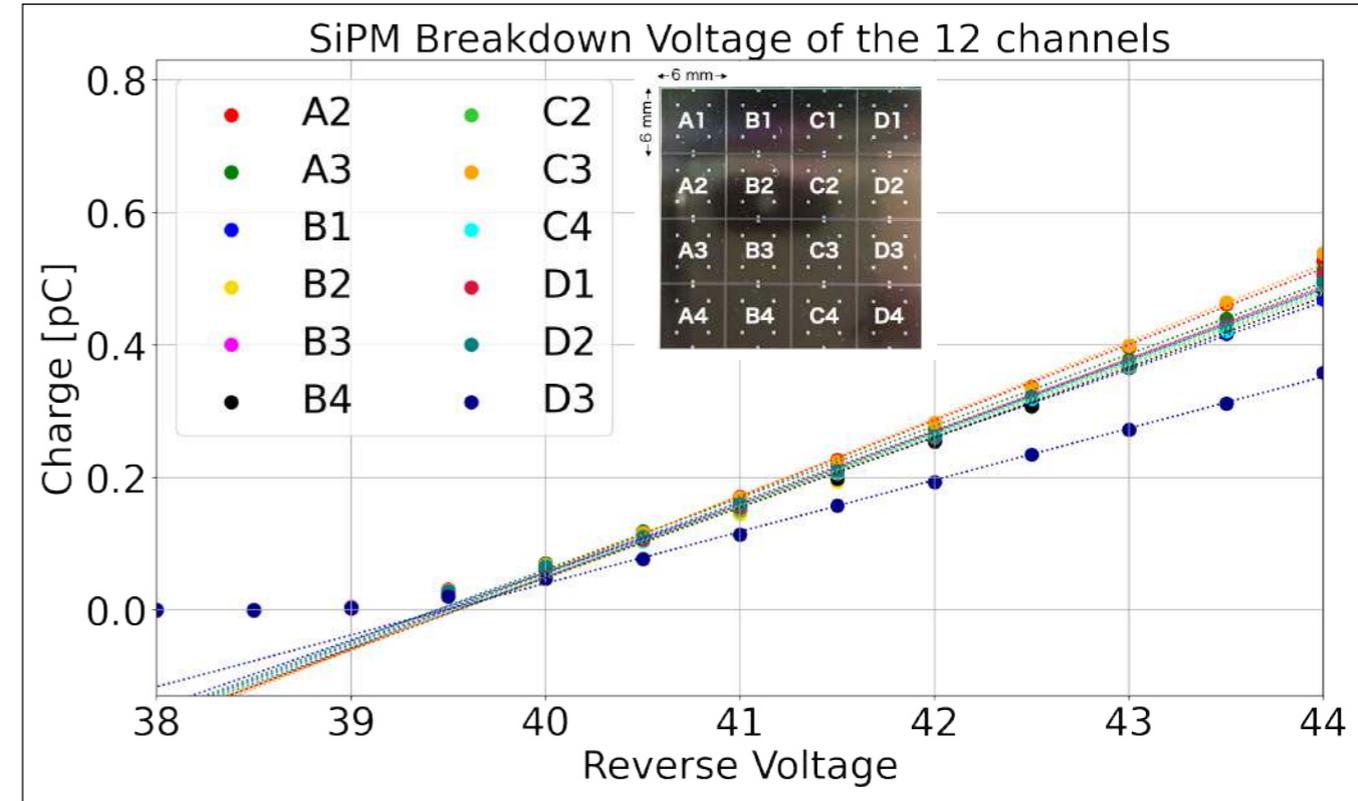
(2) 降伏電圧

- 降伏電圧は 39.50 ± 0.04 V と推定された

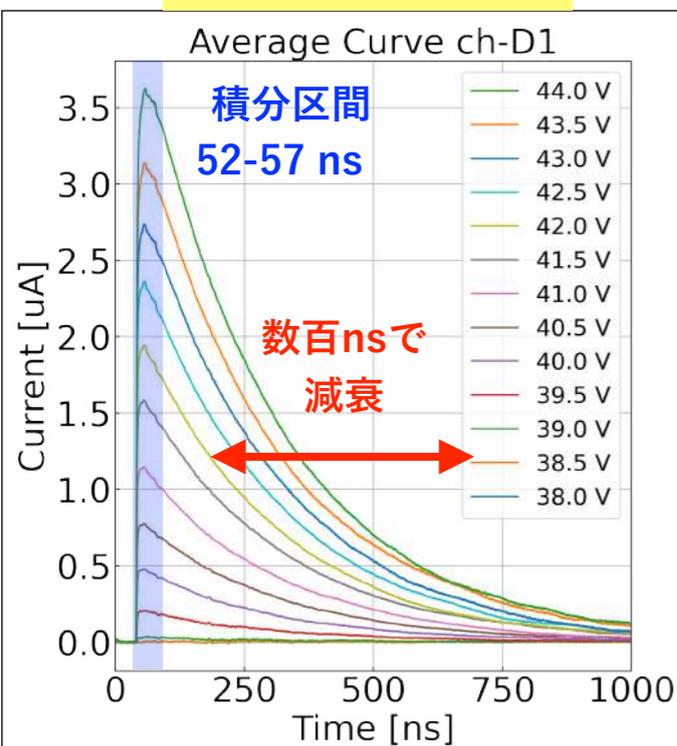
測定した12チャンネルは問題なく動作した

ゲインの揺らぎ: ~4.3%

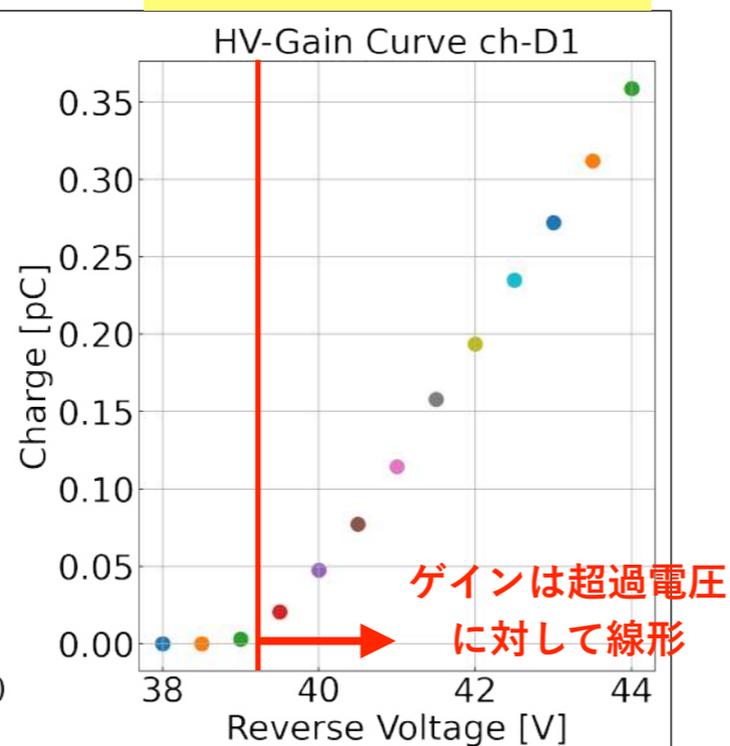
降伏電圧の揺らぎ: ~0.1%



SiPMの平均出力波形



平均電荷の印加電圧依存性



チャンネル	降伏電圧	チャンネル	降伏電圧
A2	39.50	C2	39.55
A3	39.44	C3	39.52
B1	39.44	C4	39.52
B2	39.55	D1	39.48
B3	39.48	D2	39.55
B4	39.54	D3	39.48

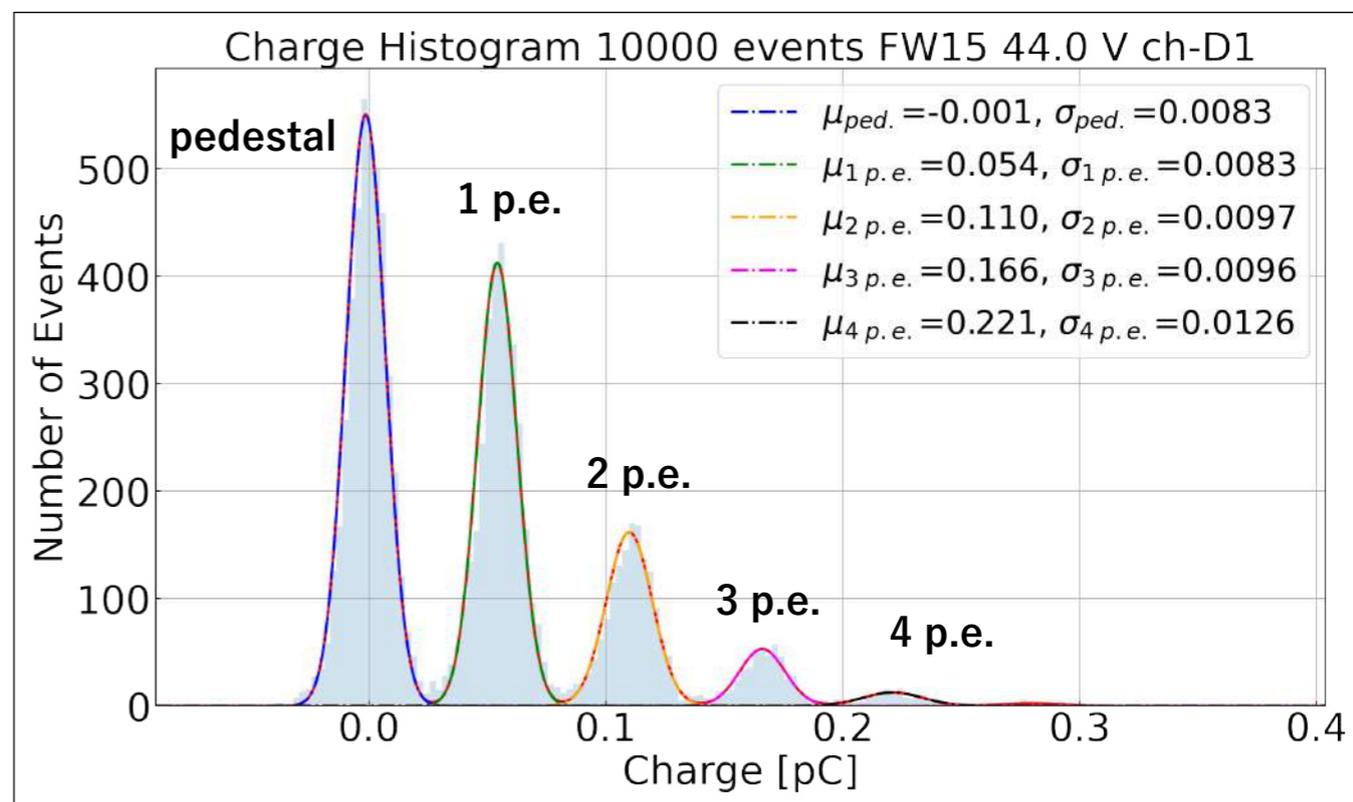
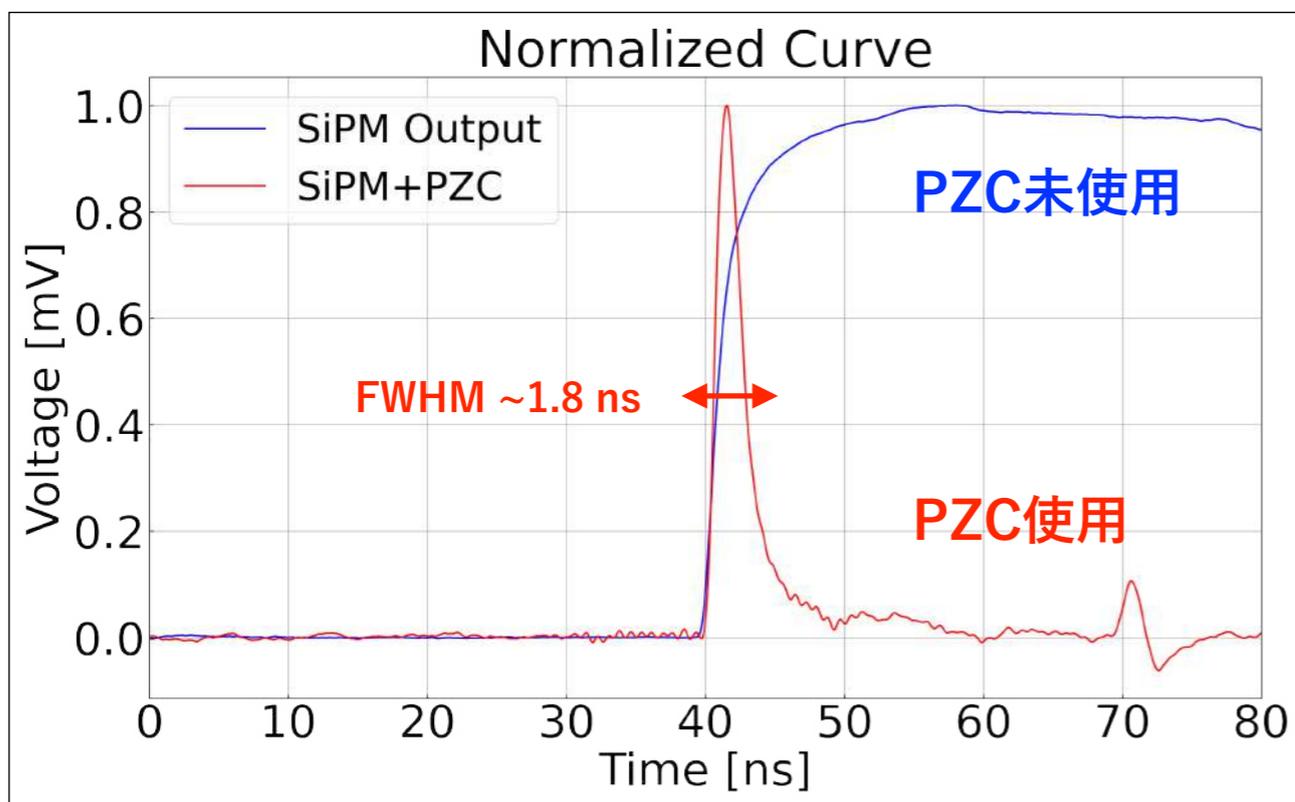
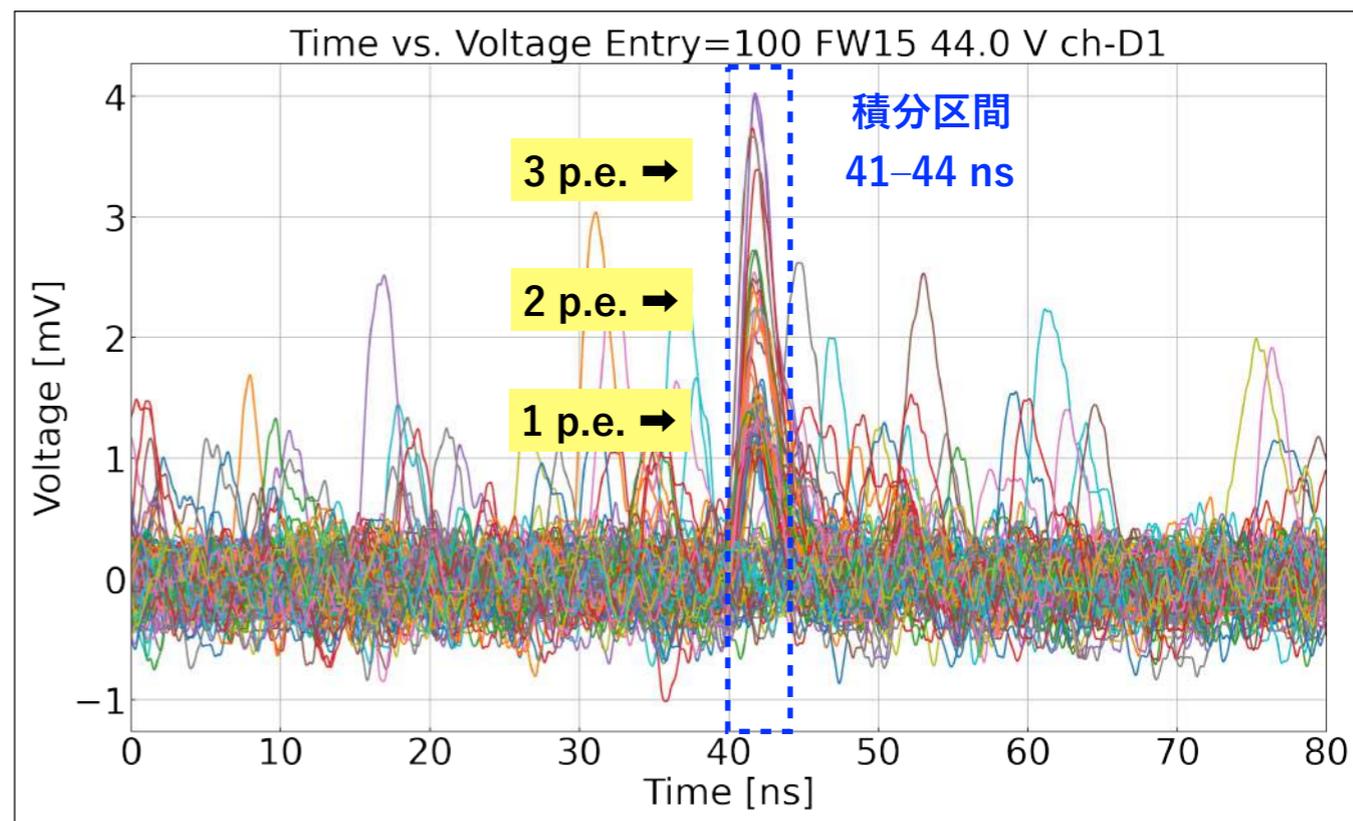
(3) 信号の波形整形

- 信号の半値幅 (FWHM) は約**1.8 ns**
- ✓ PMTへの要求値は**3 ns**

(4) 電荷分解能

- 電荷分布を多重ガウシアンでフィッティングし、各ピークの平均値と標準偏差を計算
- 電荷分解能の計算式:

$$\sqrt{\sigma_{1 \text{ p.e.}}^2} = 0.15 \text{ p.e.} \quad \text{OCTの補正なし}$$



(5) OCTの電圧依存性

- 計算式:

$$p(k \text{ p.e.}) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

$$P_{\text{OCT}} = 1 - \frac{p_{\text{obs}}(1 \text{ p.e.})}{p_{\text{est}}(1 \text{ p.e.})}$$

$$p_{\text{obs}}(1 \text{ p.e.}) = N_{1 \text{ p.e.}} / N_{\text{all}}$$

$$\lambda = -\ln p(0 \text{ p.e.})$$

$$p_{\text{est}}(1 \text{ p.e.}) = \lambda e^{-\lambda}$$

✓ OCTの確率から電荷分解能を補正する

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\sigma_{1 \text{ p.e.}}^2 + \sigma_{\text{OCT}}^2} \sim 0.28 \text{ p.e.} \quad \text{補正後}$$

OCTを考慮した1 p.e.の分布の分散

(6) 信号の合成

- 2チャンネル合成 (A2+B2)

✓ 電荷分解能:

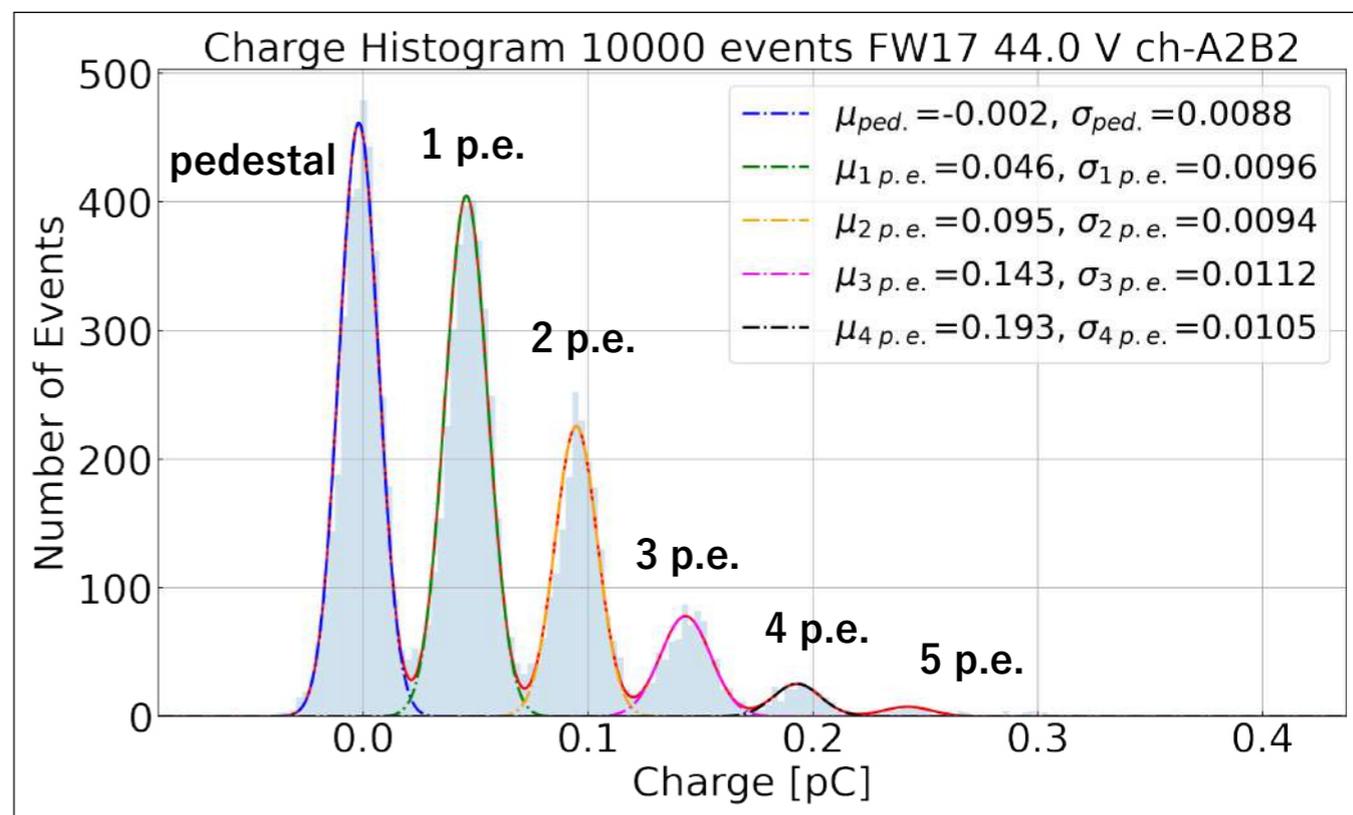
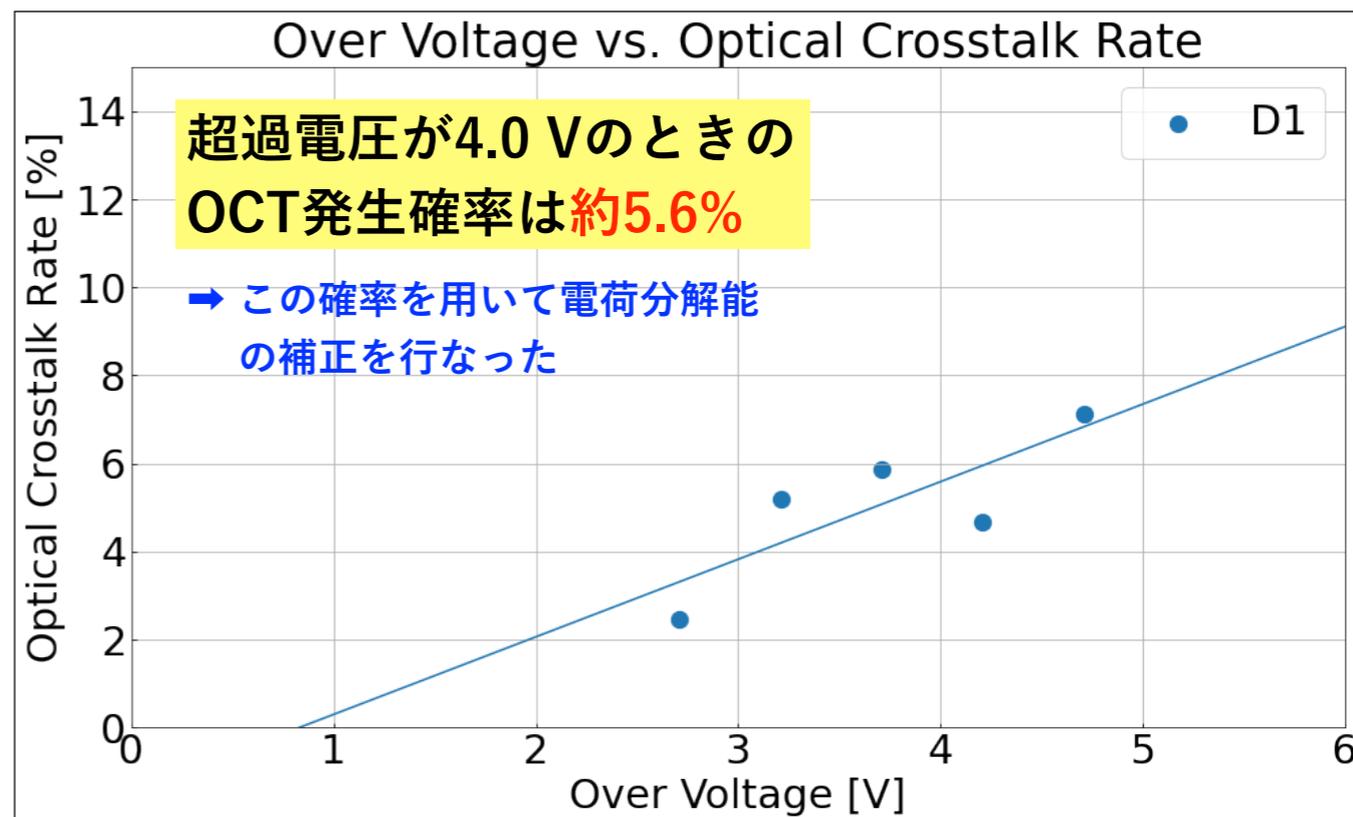
$$\sigma_{\text{eff}} \sim 0.31 \text{ p.e.} \quad \text{補正後}$$

✓ 1チャンネルと比べて約1.1倍悪化

- 4チャンネル合成

✓ 測定中

**2チャンネル合成までの電荷分解能は
PMTの電荷分解能の許容範囲 ($\sigma_{\text{eff}} < 0.47$) に収まった**



- 目的: PMTとSiPMの性能比較のため, SiPMの基礎特性を測定する

測定結果

動作確認のための測定

特に重要な測定項目

(1) ゲインの電圧依存性

- 超過電圧に対して**1次の関係**になった
- 印加電圧42.0 Vでのゲインは $(2.33 \pm 0.10) \times 10^5$

(2) 降伏電圧

- 降伏電圧は 39.50 ± 0.04 Vと推定された

測定した12チャンネルは問題なく動作した
ゲインの揺らぎ: ~4.3%, 降伏電圧の揺らぎ: ~0.1%

(3) 信号の波形整形

- PZCによって信号のFWHMを**約1.8 ns**に短縮
★ LSTの要求値は~3 ns

(4) 電荷分解能

- 1チャンネル測定時:
 - ▶ OCT補正後の電荷分解能: $\sigma_{\text{eff}} = 0.28$ p.e.

(5) OCTの電圧依存性

- 超過電圧に対して**1次の関係**
- 超過電圧4.0 VでのOCT発生確率は約5.6%

(6) 信号の合成

- 2チャンネル合成時:
 - ▶ OCT補正後の電荷分解能: $\sigma_{\text{eff}} = 0.31$ p.e.
- 4チャンネル合成時: 測定中

**2チャンネル合成までの電荷分解能は
PMTの電荷分解能の許容範囲 ($\sigma_{\text{eff}} < 0.47$) に収まった**

など

今後の展望

- 4チャンネルでの信号合成
- アフターパルスの測定
- 降伏電圧やゲインの温度依存性の測定
- PMTとの性能比較