

CTA 報告 127 : ガンマ線望遠鏡 CTA における SiPM の多チャンネル同時較正システムの確立と検証

中村 裕樹、奥村 暁、片桐 秀明^A、田島 宏康、三浦 智佳^A、
他 CTA Consortium

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (ISEE) 、茨城大理^A

2017 年 9 月 13 日 日本物理学会



Cherenkov Telescope Array (CTA)

▶ 小・中口径望遠鏡

高エネルギーガンマ線を観測する

→ 多数の望遠鏡を配置し有効面積を拡大する

▶ 設置台数を増やすために一台あたりの費用を低くすることが重要

Large-sized
Telescope (LST)

D = 23 m
E = 20 - 200 GeV
N = 4@North + 4@South

Medium-sized
Telescope (MST)

D = 12 m
E = 100 GeV - 10 TeV
N = 15@North + 25@South

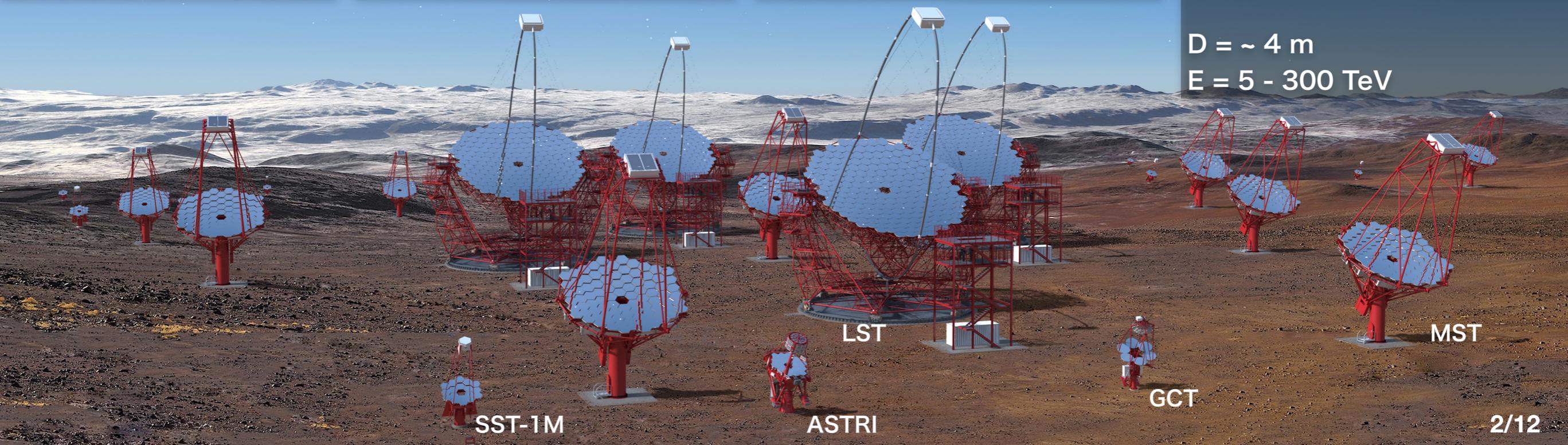
Schwarzschild-Couder
Telescope (SCT)

D = 9.6 m
E = 200 GeV - 10 TeV
N = 25@South

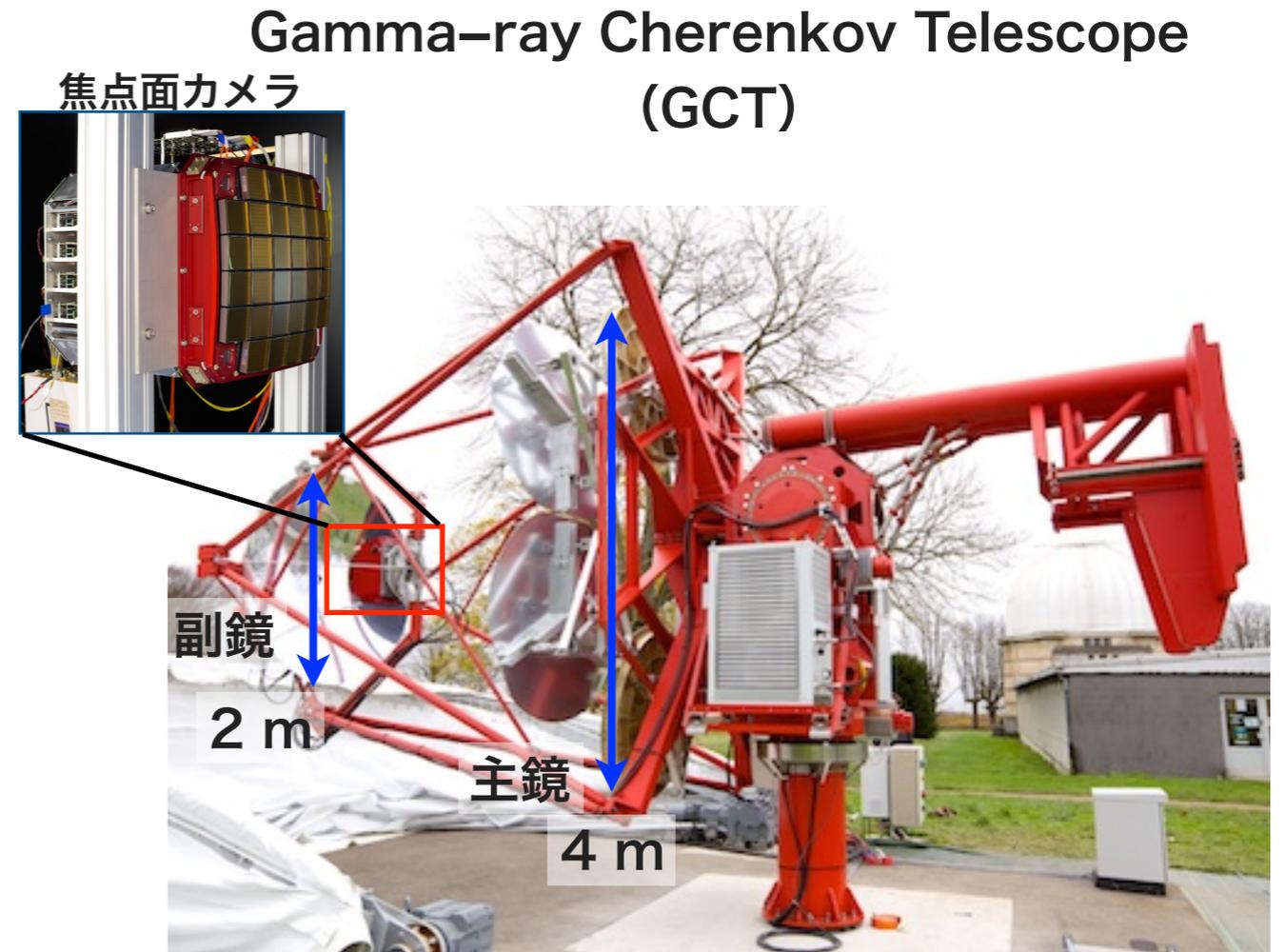
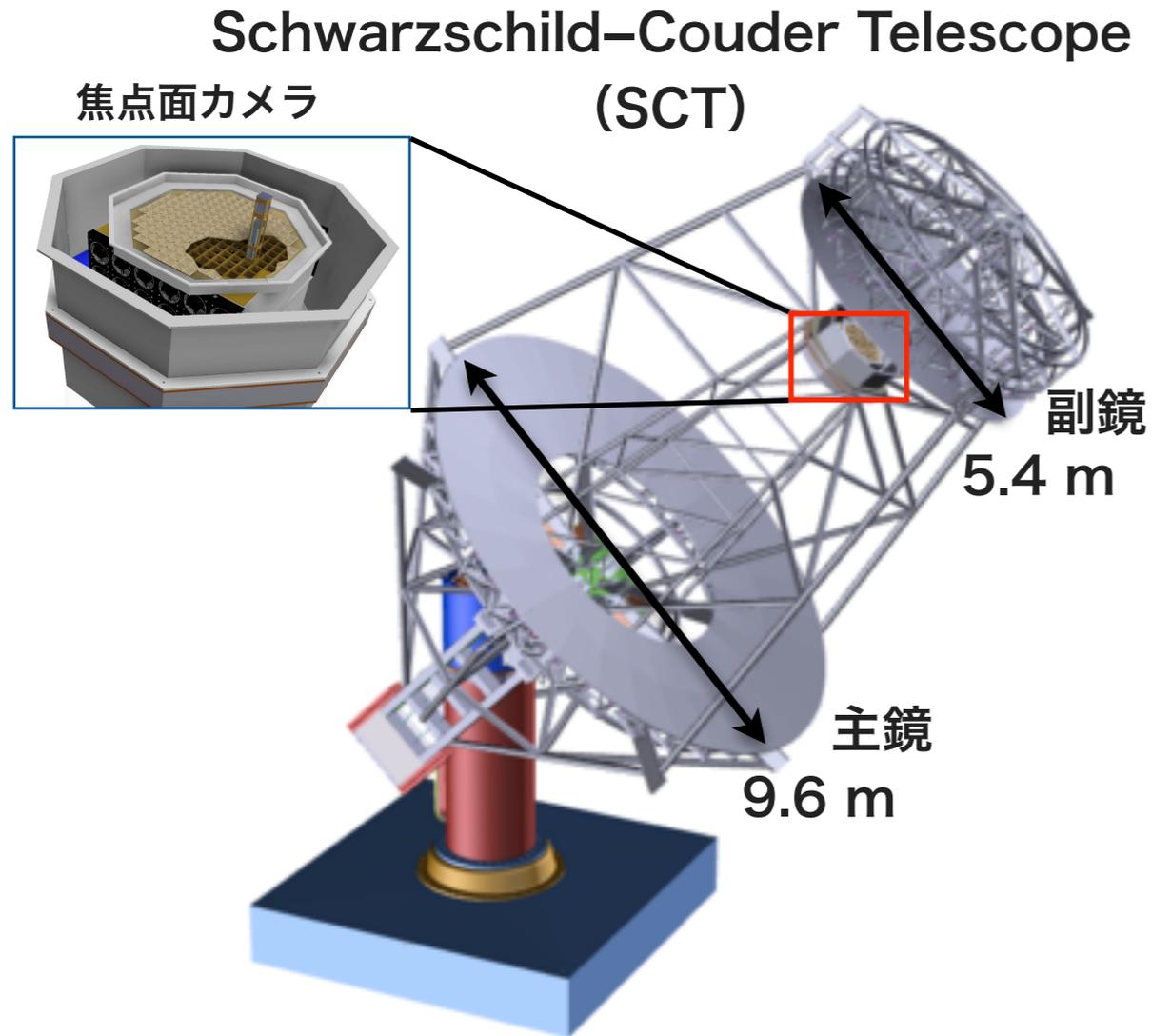
Small-sized
Telescope (SST)

GCT 35@South
ASTRI 35@South
Davis-Cotton 20@South

D = ~ 4 m
E = 5 - 300 TeV



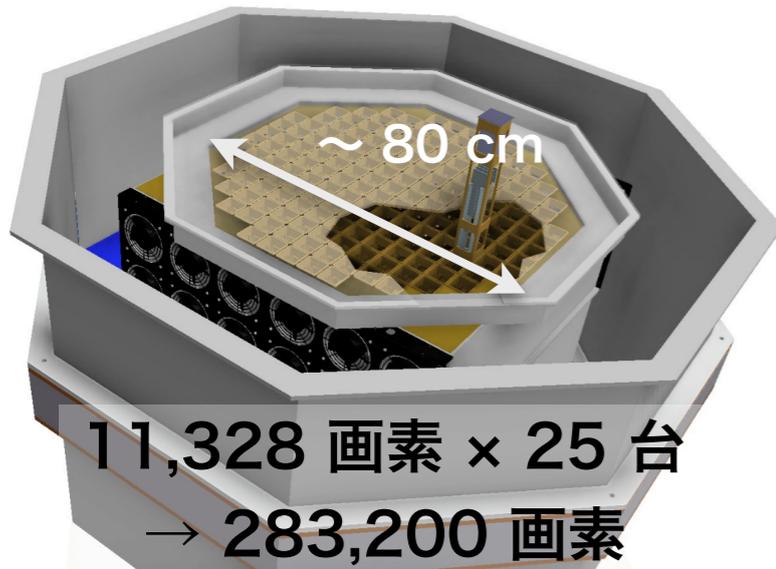
SC 光学系を用いた小・中口径望遠鏡



- ▶ 小・中口径望遠鏡の一部では Schwarzschild-Couder 光学系 (SC 光学系) を採用する
→ 副鏡によって焦点距離が短縮され焦点面カメラを小さくできる
- ▶ カメラ一台あたりの費用が低くなり望遠鏡の設置台数を増やすことができる

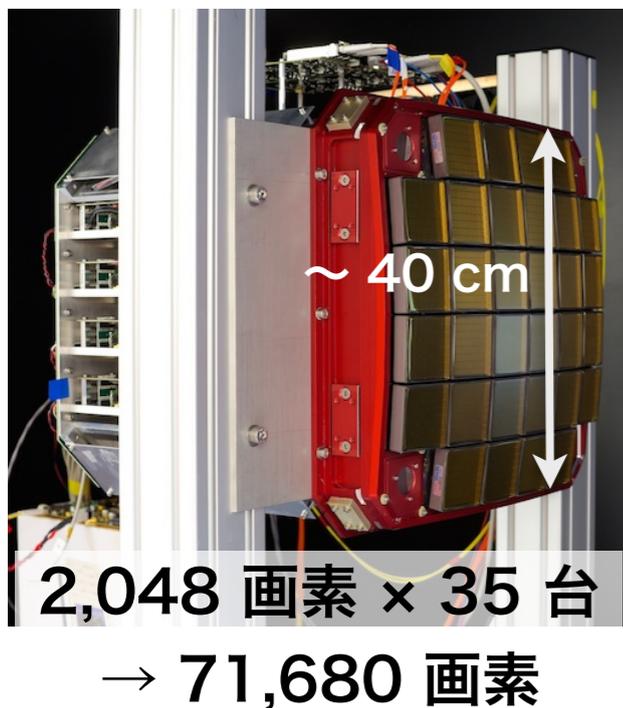
焦点面カメラの較正

SCT 用



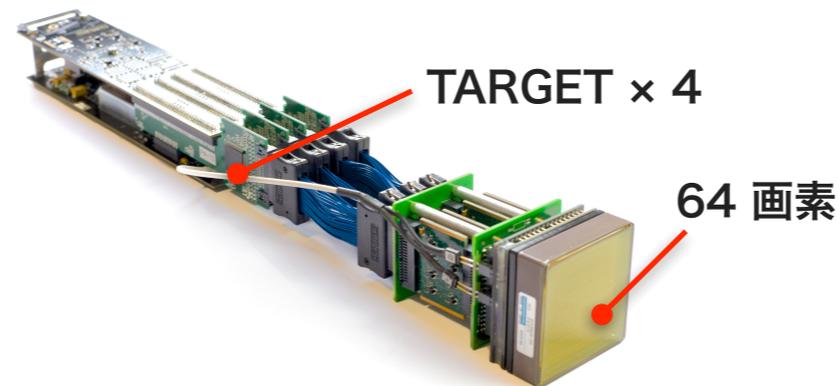
- ▶ カメラの小型化に伴い、各画素の大きさも小さくなる
→ 光検出器に半導体光電子増倍素子 (SiPM) を採用
- ▶ 合計で数十万画素に及ぶ SiPM の較正が必要
→ SiPM と前置処理回路を焦点面カメラとして組み上げての一括較正を目指す
- ▶ 焦点面カメラ一括較正の第一段階としてカメラモジュール単体で行った
(SCT と GCT でカメラモジュールはほぼ同一)

GCT 用



- ▶ 望遠鏡搭載後の再較正を考慮して、カメラモジュール全体に光を照射することで、全ピクセル一括で較正する

カメラモジュール



※ 試作機のため光検出器には MAPMT を使用

焦点面カメラの較正

❖ 焦点面カメラの較正方法への要求

- ✓ 多チャンネル一括で行う
- ✓ 望遠鏡に搭載状態での較正が可能である

較正項目

▶ オプティカルクロストーク

オプティカルクロストークによって単一光電子を複数光電子として検出してしまふ
→ 検出光電子数を多く見積もってしまう

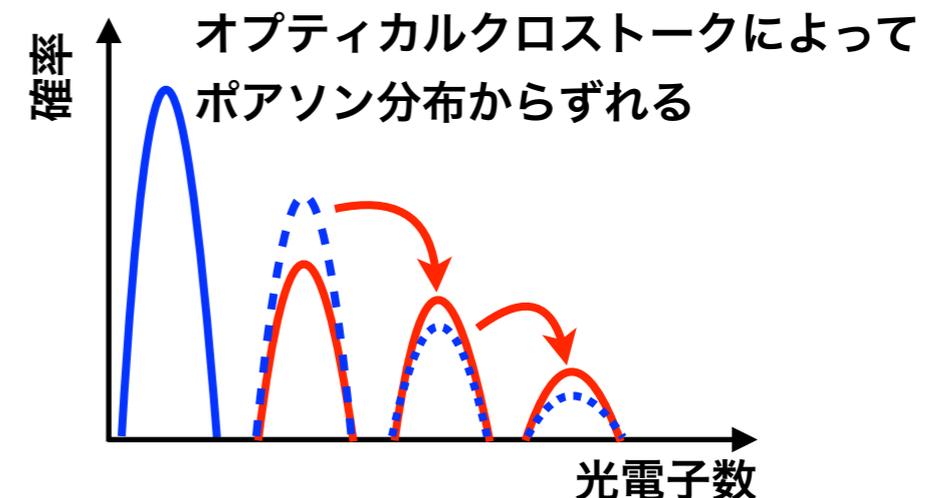
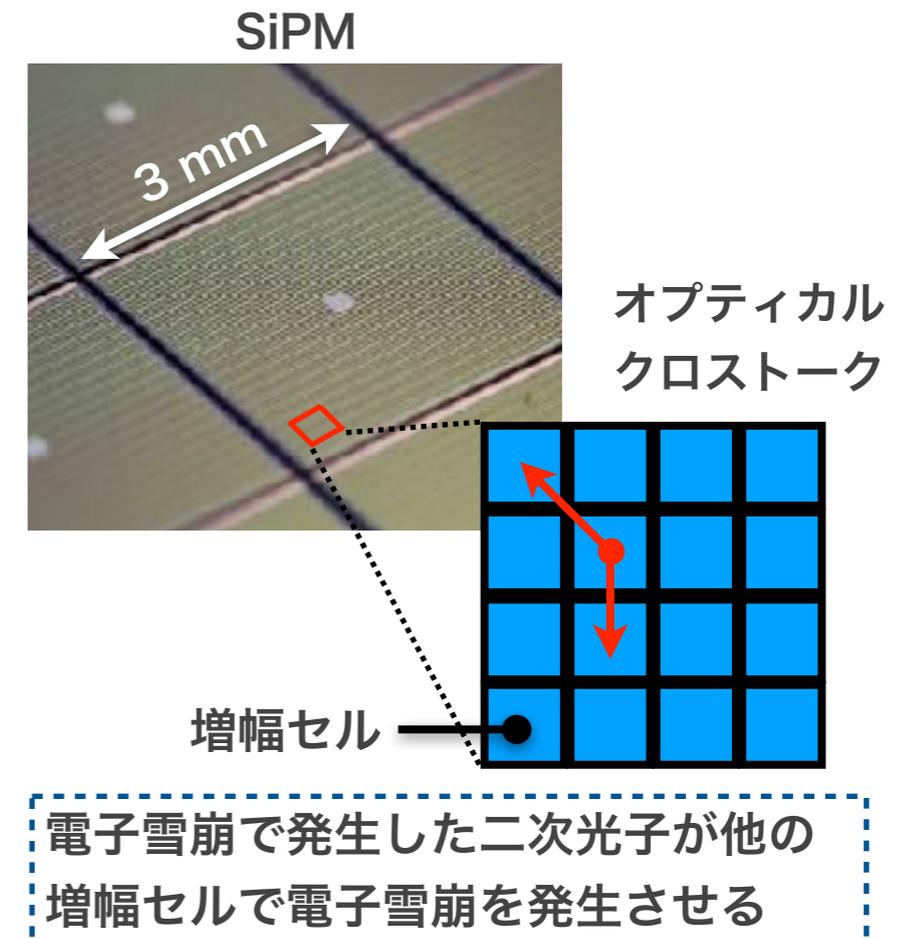
▶ ゲイン特性

絶対光量の較正は μ 粒子によって生じるチェレンコフ光を用いる
この較正はイベントごとに行うため画素間の相対的な較正は別途必要
→ 各画素の入射光電子数と出力電圧の較正をすることで相対的な較正とする

▶ サンプリングタイミング ※ 今回は説明しない

電圧値の記録タイミングにはわずかにズレが生じる
→ 波形が歪み電荷分解能が悪くなる
このズレを測定し補正することで電荷分解能を改善する

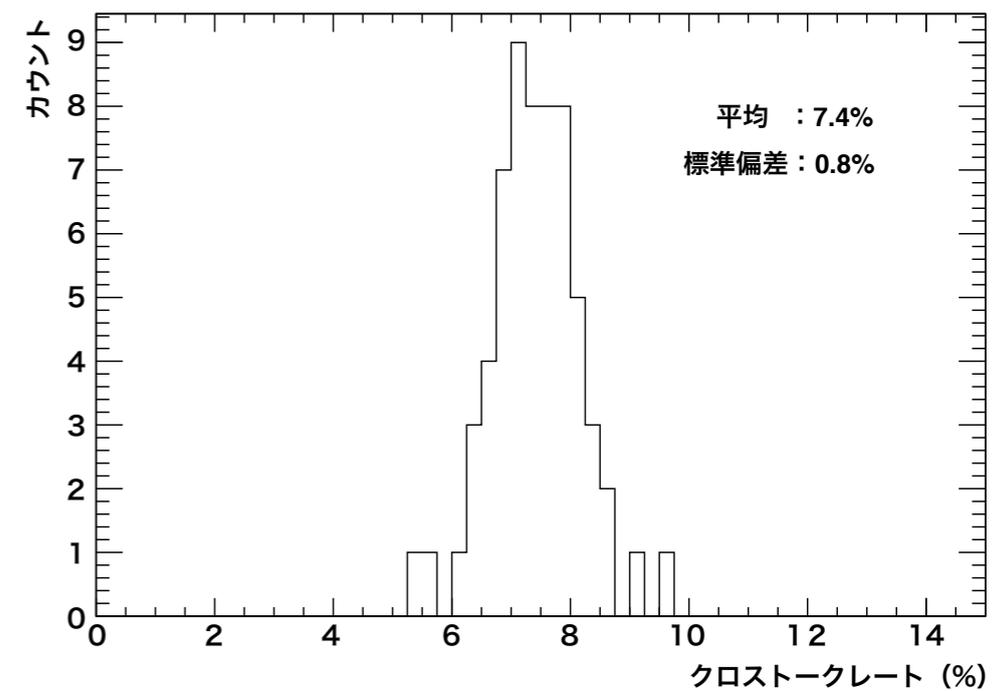
▶ 光検出効率、トリガースレッシュホールドなど ※ 今回は説明しない



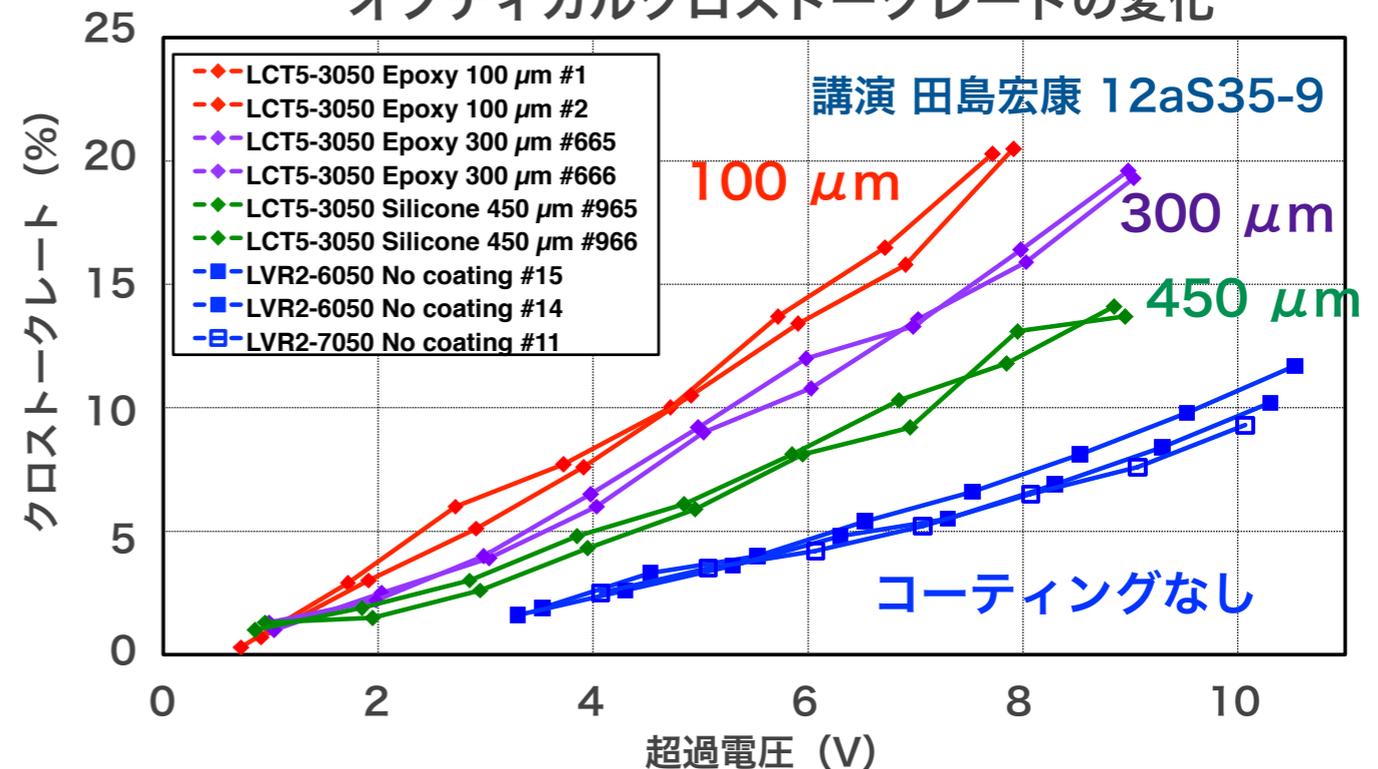
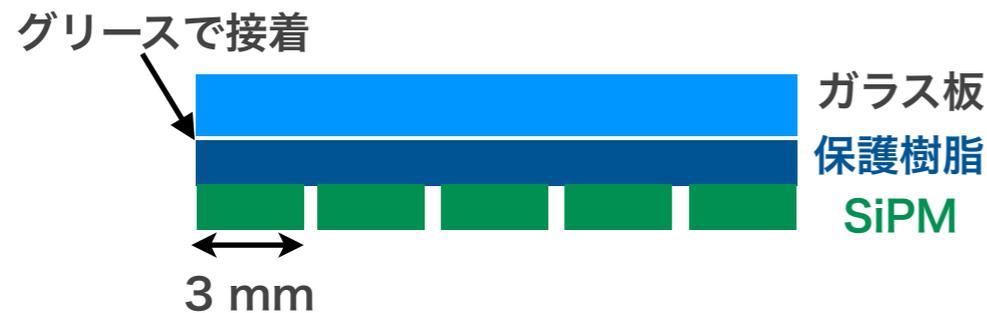
オプティカルクロストークレート

- ▶ 前回までに 64 画素一括でのクロストークレートの測定を初めて行った
- ▶ 1 画素 SiPM によってクロストークレートを低減する改良が行われ、表面樹脂の厚みによってクロストークレートが変化することがわかった
 - 表面樹脂での反射がクロストークの原因と考えられる
- ▶ 64 画素 SiPM の表面にガラス板を貼り付け擬似的に表面樹脂の厚さを変化させ、オプティカルクロストークレートの変化を測定した

オプティカルクロストークレートのばらつき



1画素 SiPM の表面樹脂の厚みによるオプティカルクロストークレートの変化

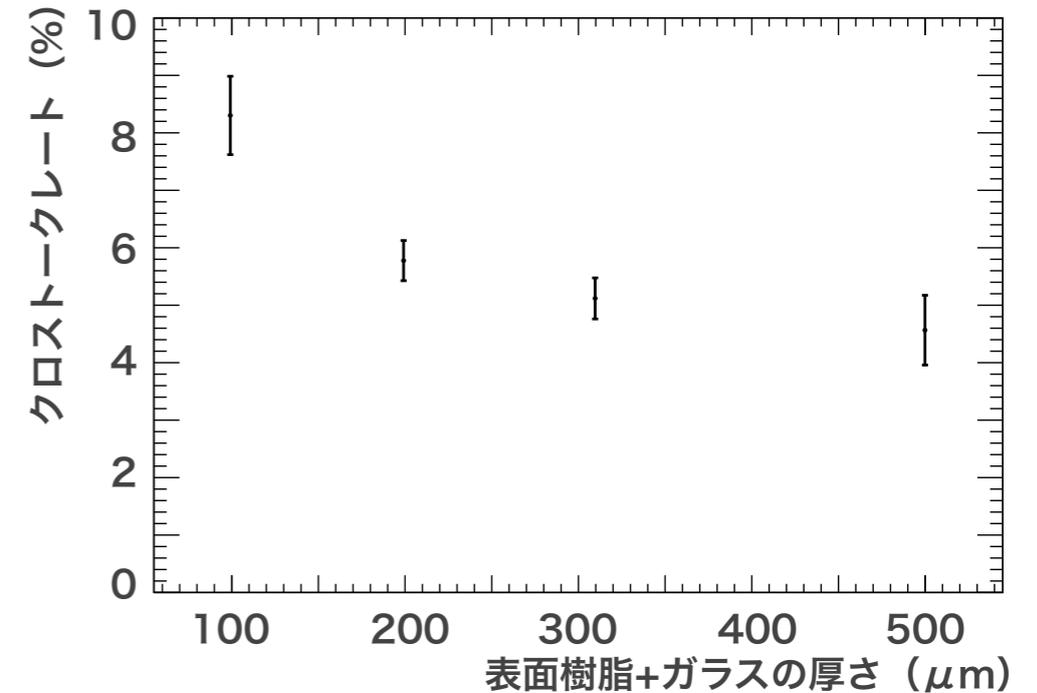


オプティカルクロストークレート

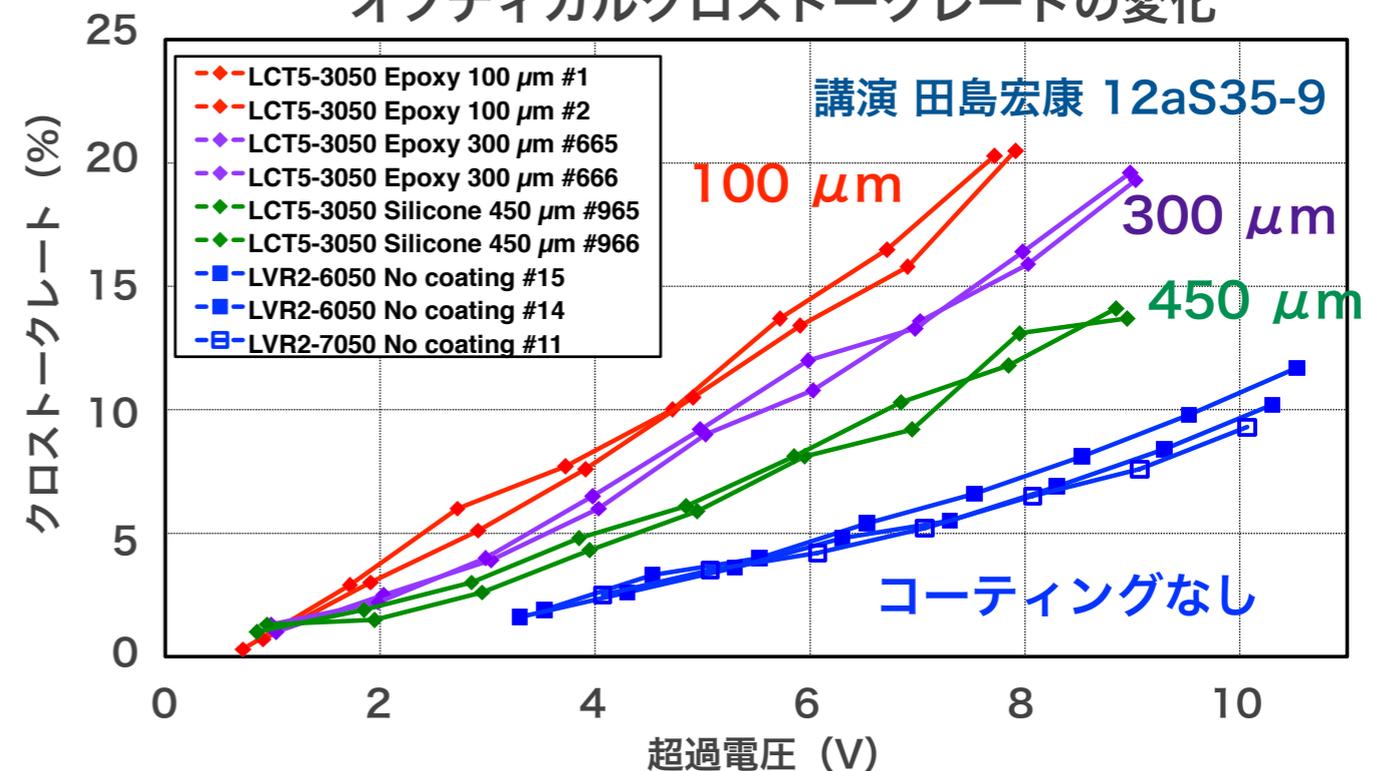
- ▶ 前回までに 64 画素一括でのクロストークレートの測定を初めて行った
- ▶ 1 画素 SiPM によってクロストークレートを低減する改良が行われ、表面樹脂の厚みによってクロストークレートが変化することがわかった
 - 表面樹脂での反射がクロストークの原因と考えられる
- ▶ 64 画素 SiPM の表面にガラス板を貼り付け擬似的に表面樹脂の厚さを変化させ、オプティカルクロストークレートの変化を測定した
 - ガラスを厚くすることでオプティカルクロストークレートは減少する (1 画素と同じ傾向)

↓
表面樹脂を厚くする方が良い

64 画素 SiPM の表面樹脂の厚みによるオプティカルクロストークレートの変化



1 画素 SiPM の表面樹脂の厚みによるオプティカルクロストークレートの変化



オプティカルクロストークレート

- ▶ 前回までに 64 画素一括でのクロストークレートの測定を初めて行った
- ▶ 1 画素 SiPM によってクロストークレートを低減する改良が行われ、表面樹脂の厚みによってクロストークレートが変化することがわかった
 - 表面樹脂での反射がクロストークの原因と考えられる
- ▶ 64 画素 SiPM の表面にガラス板を貼り付け擬似的に表面樹脂の厚さを変化させ、オプティカルクロストークレートの変化を測定した
 - ガラスを厚くすることでオプティカルクロストークレートは減少する (1 画素と同じ傾向)

表面樹脂を厚くする方が良い

オプティカルクロストークの原因がガラス表面での反射とすると反射された光が周辺の画素で検出されると考えられる

→ 周辺画素へのオプティカルクロストークレートを測定した

❖ 表面樹脂の厚さによる光の経路の違い

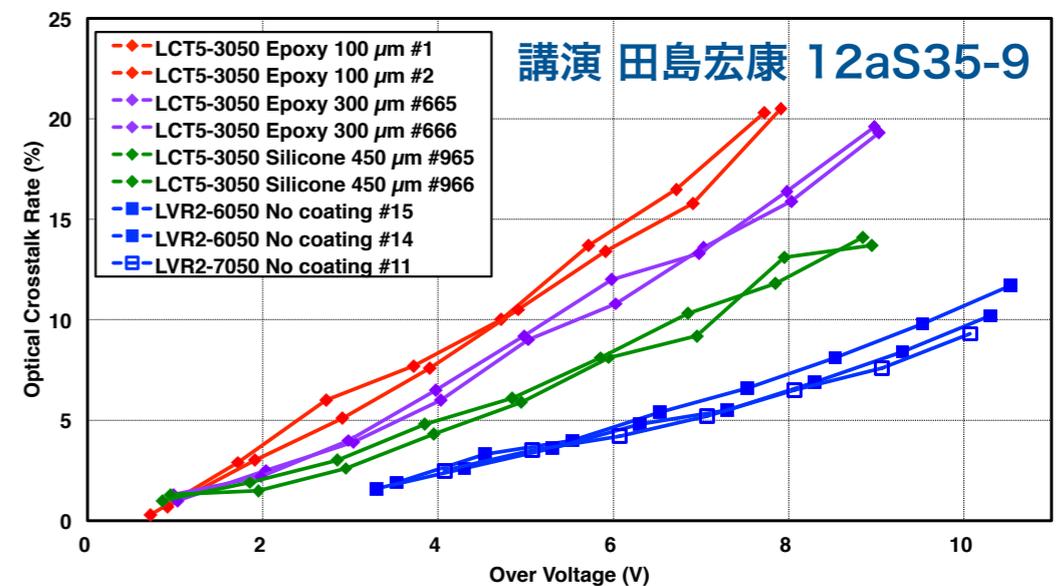
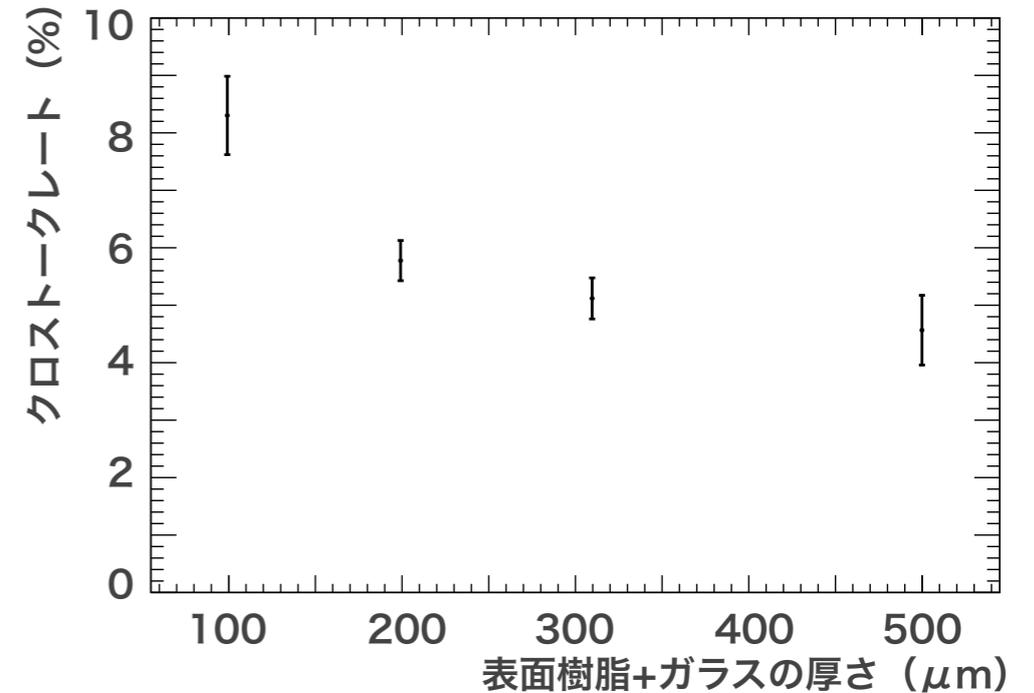
表面樹脂
SiPM



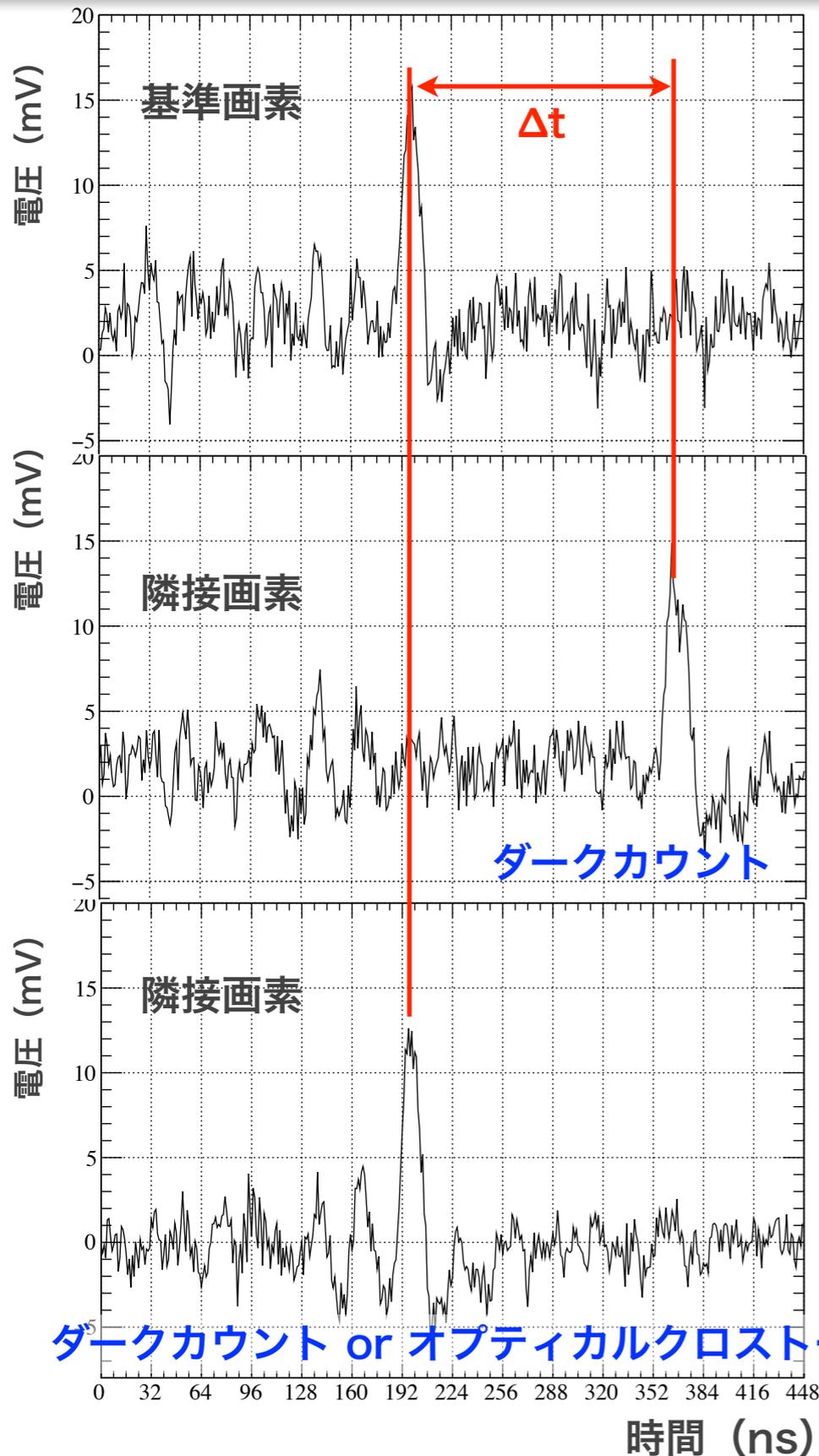
SiPM アレイの場合、隣の画素で検出される



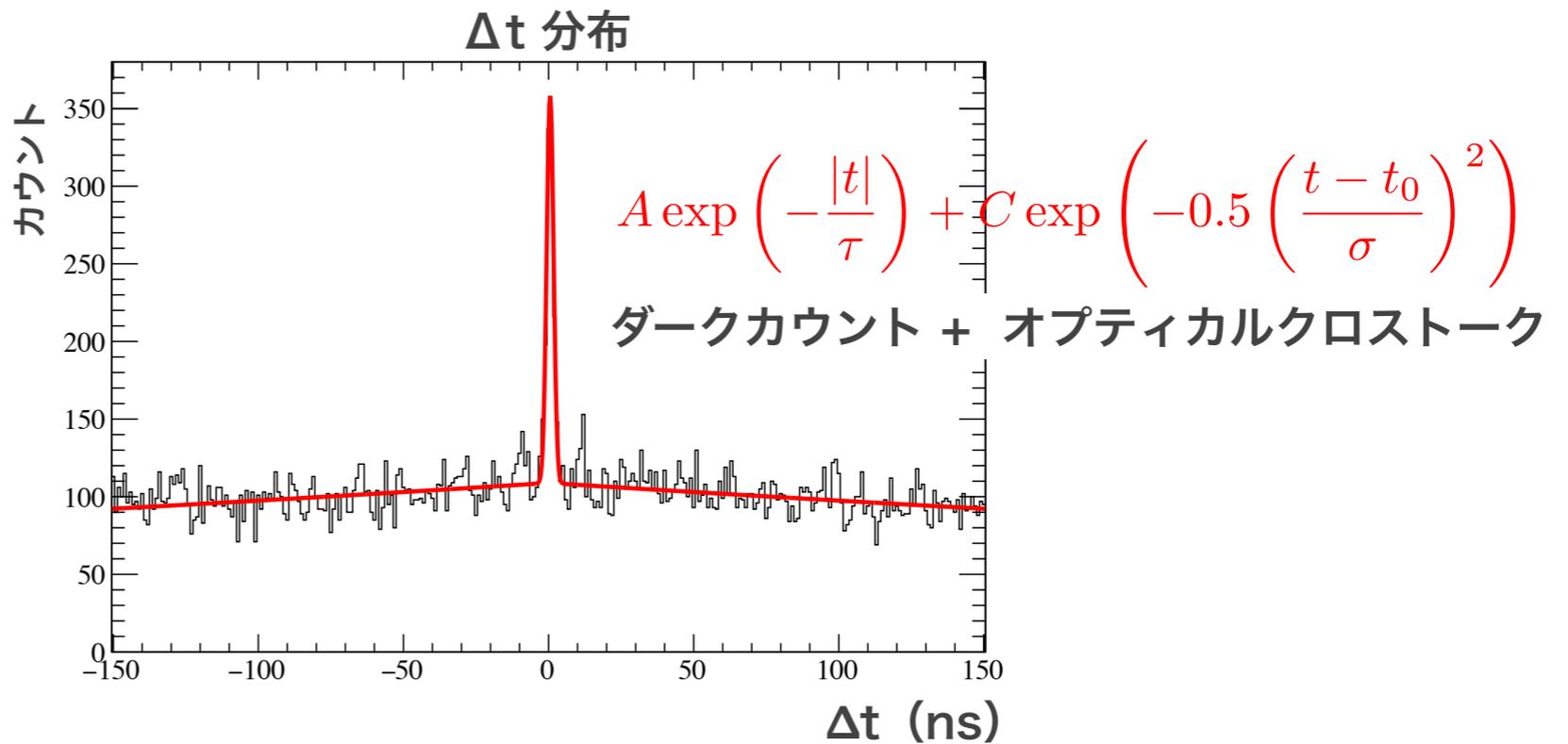
64 画素 SiPM の表面樹脂の厚みによるオプティカルクロストークレートの変化



周辺画素へのオプティカルクロストーク



- ▶ SiPM アレイでは周辺画素へオプティカルクロストークが発生していると考えられる
- 2つの画素での光電子の検出時間差を測定し、同時に光電子を検出しているイベントの増加数を推定した



Δt 分布はダークカウントとオプティカルクロストークを足し合わせたものになる

周辺画素へのオプティカルクロストークレートを次式で定義した

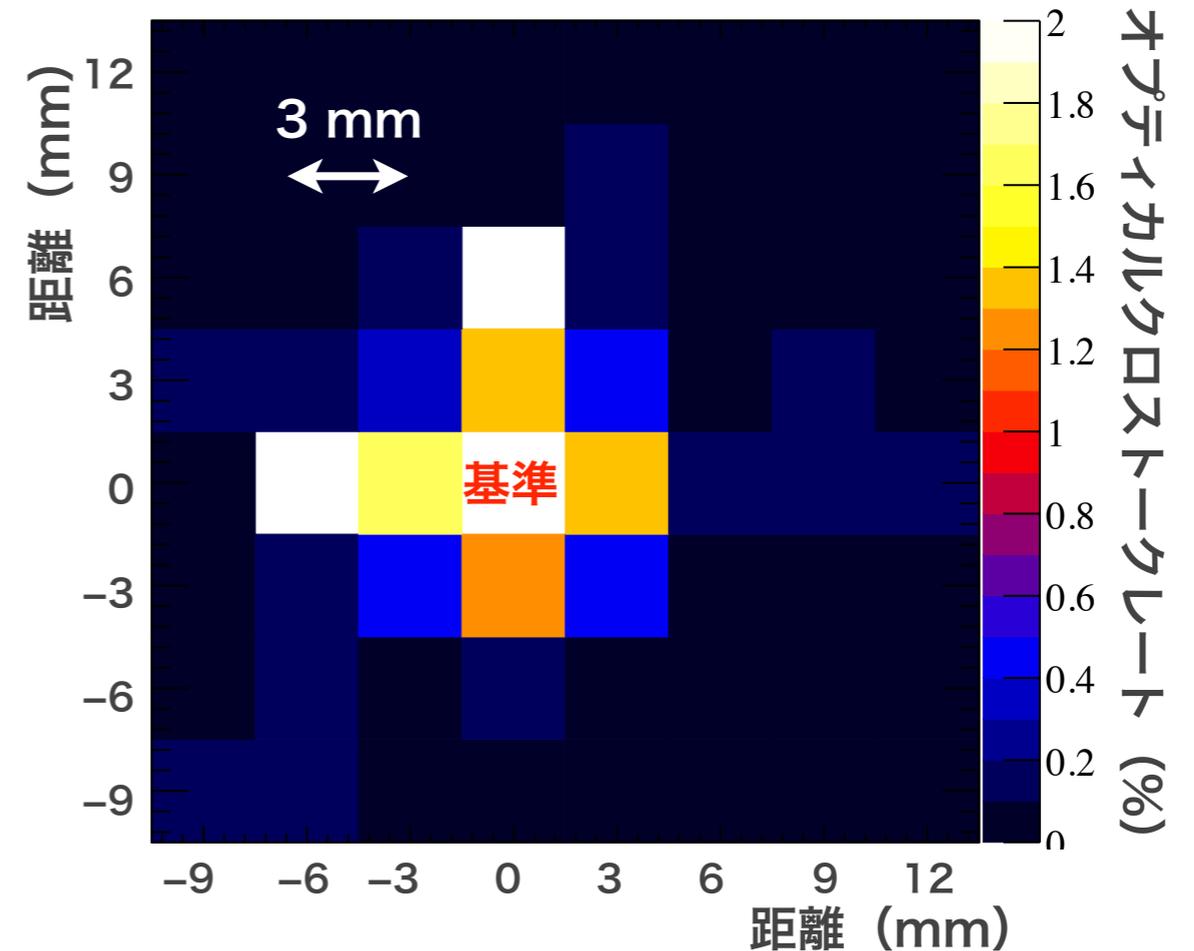
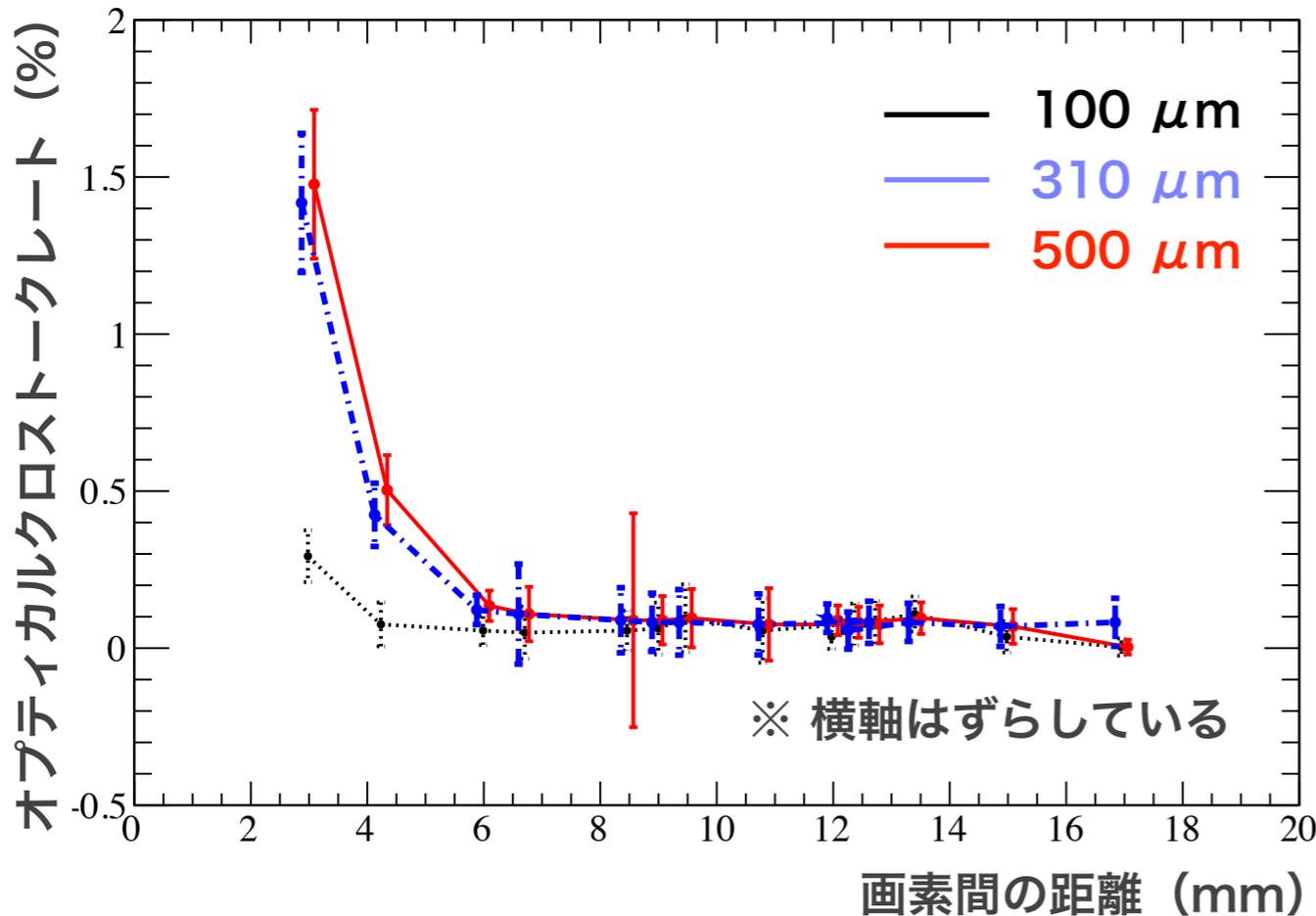
$$\text{Optical crosstalk rate} = \frac{\int C \exp\left(-0.5 \left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2\right) dt}{\text{Number of events}}$$

ダークカウント or オプティカルクロストーク

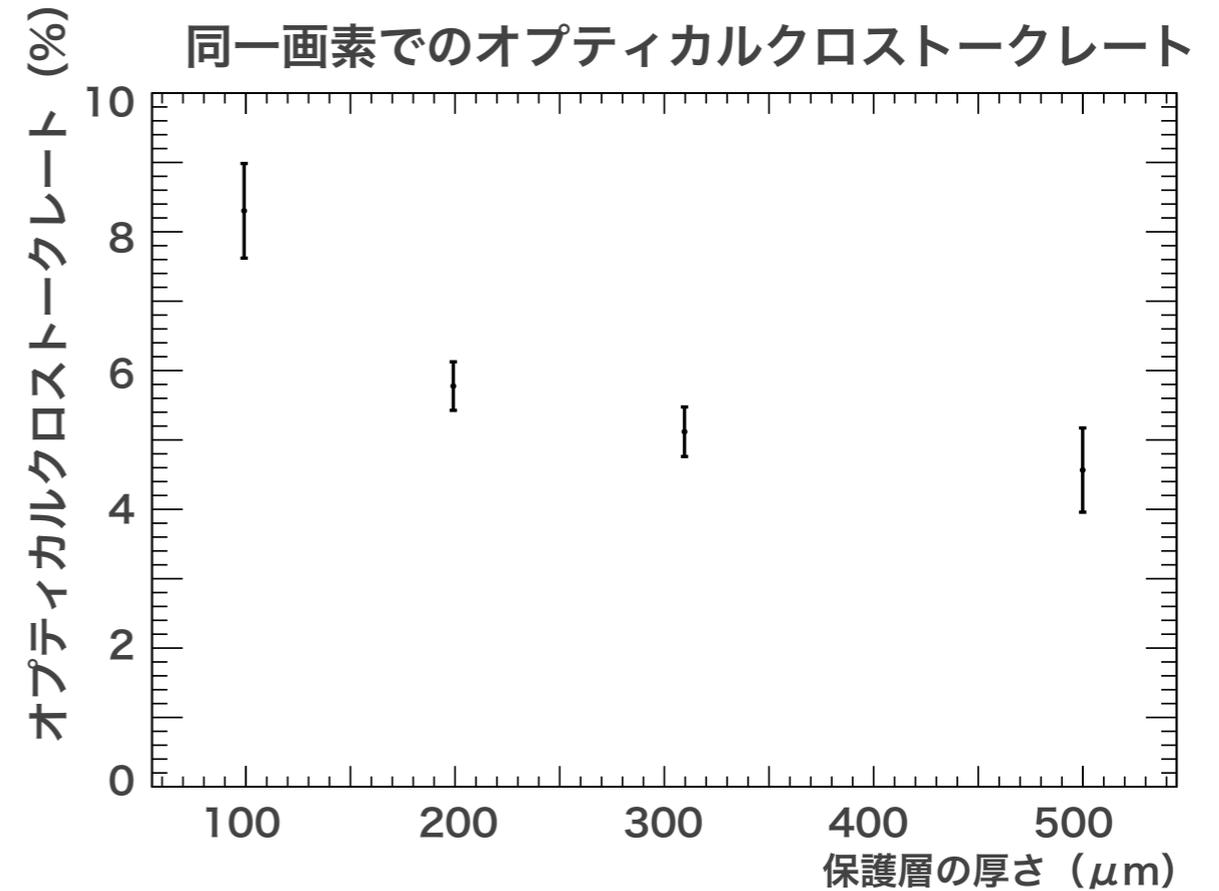
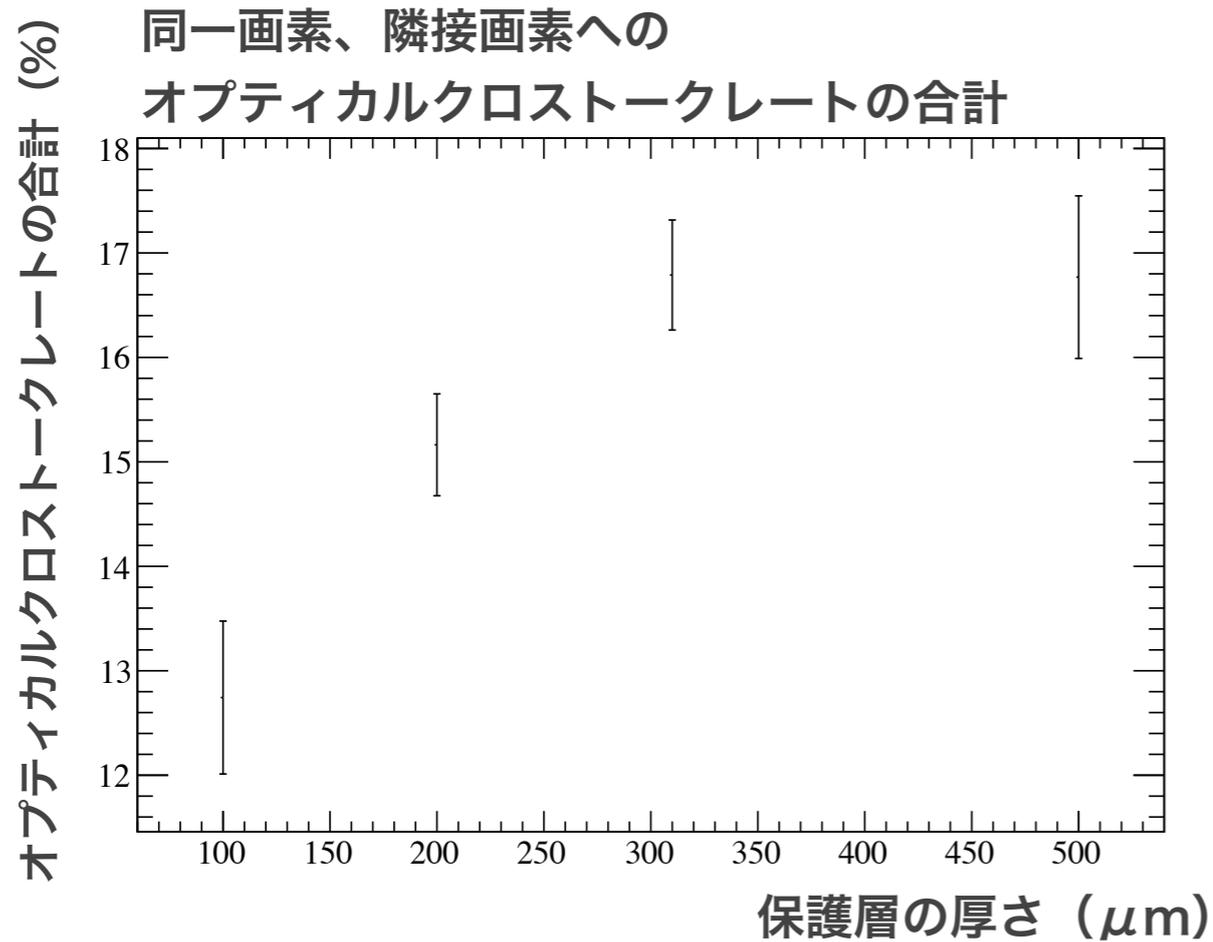
周辺画素へのオプティカルクロストークレート

- ▶ 距離の最も近い画素での光電子同時検出イベントが増加している
→ 周辺画素へのオプティカルクロストークが発生している
- ▶ SiPM 表面にガラス板を貼り付け保護層の厚さによる変化を測定した
→ ガラスを厚くすると周辺画素へのオプティカルクロストークが増加する
- ◆ 保護層が薄い方が反射光は同一画素へ戻る確率が高い
- ▶ 厚さ 310 μm と 500 μm では同程度のオプティカルクロストークレート

保護層の厚さによるオプティカルクロストークレートの違い



周辺画素へのオプティカルクロストークレート



- ▶ 同一画素、隣接画素へのオプティカルクロストークレートの合計は厚さ 100 μm の時が最も低い
→ 保護層が薄い時、同一増幅セル (幅 50 μm) に入射する確率が高くなるため低くなる
- ▶ 保護層を厚くすると同一画素でのオプティカルクロストークレートは低くなる
一方で周辺画素へのオプティカルクロストークレートは高くなる
- ▶ 光線追跡シミュレーションでオプティカルクロストークレートの保護層厚依存性を確認する

ゲイン特性

- ▶ 各画素の検出光電子数と波高積分値の関係を決定する
→ 望遠鏡搭載後の再校正を考慮してLED を使用した一括測定を行う
- ▶ 校正された光源を使用することは困難なため平均と標準偏差の関係から光電子数を導出する
- ▶ ゲインは検出光電子数のばらつきの中では線形とすると平均と標準偏差は

$$\mu \pm \sigma = \text{Gain}' \times N_{\text{p.e.}} \pm \frac{d\mu}{dN_{\text{p.e.}}} \sqrt{N_{\text{p.e.}}}$$

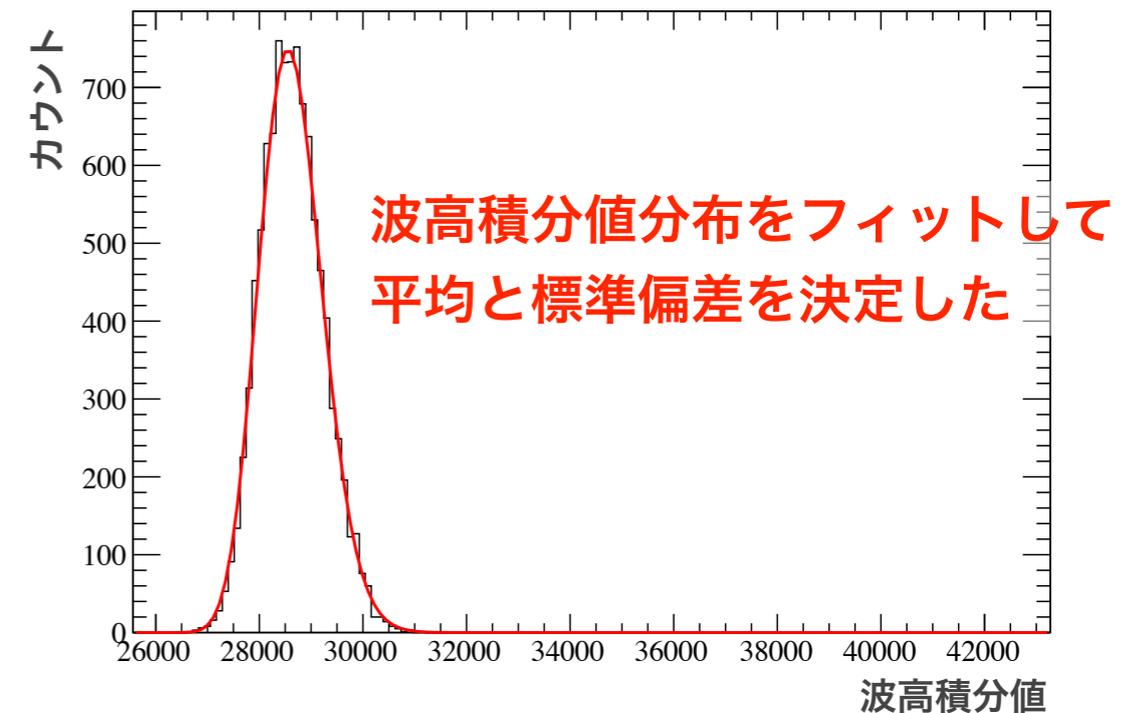
光量を変化させ各 μ に対する $d\mu/dN_{\text{p.e.}}$ を σ から導出し、光電子数と波高積分値の関係を決定する波高積分値の分離できる領域での μ と $N_{\text{p.e.}}$ の関係を初期値とした

- ▶ オプティカルクロストークによって平均と標準偏差の関係はポアソン分布からずれてしまう
入射光電子数が $N_{\text{p.e.}}$ 、オプティカルクロストークレート r のとき平均 μ と標準偏差 σ は

$$\mu = \text{Gain} \times \frac{N_{\text{p.e.}}}{1 - r} \quad \sigma = \text{Gain} \times \frac{\sqrt{N_{\text{p.e.}}(1 + r)}}{1 - r}$$

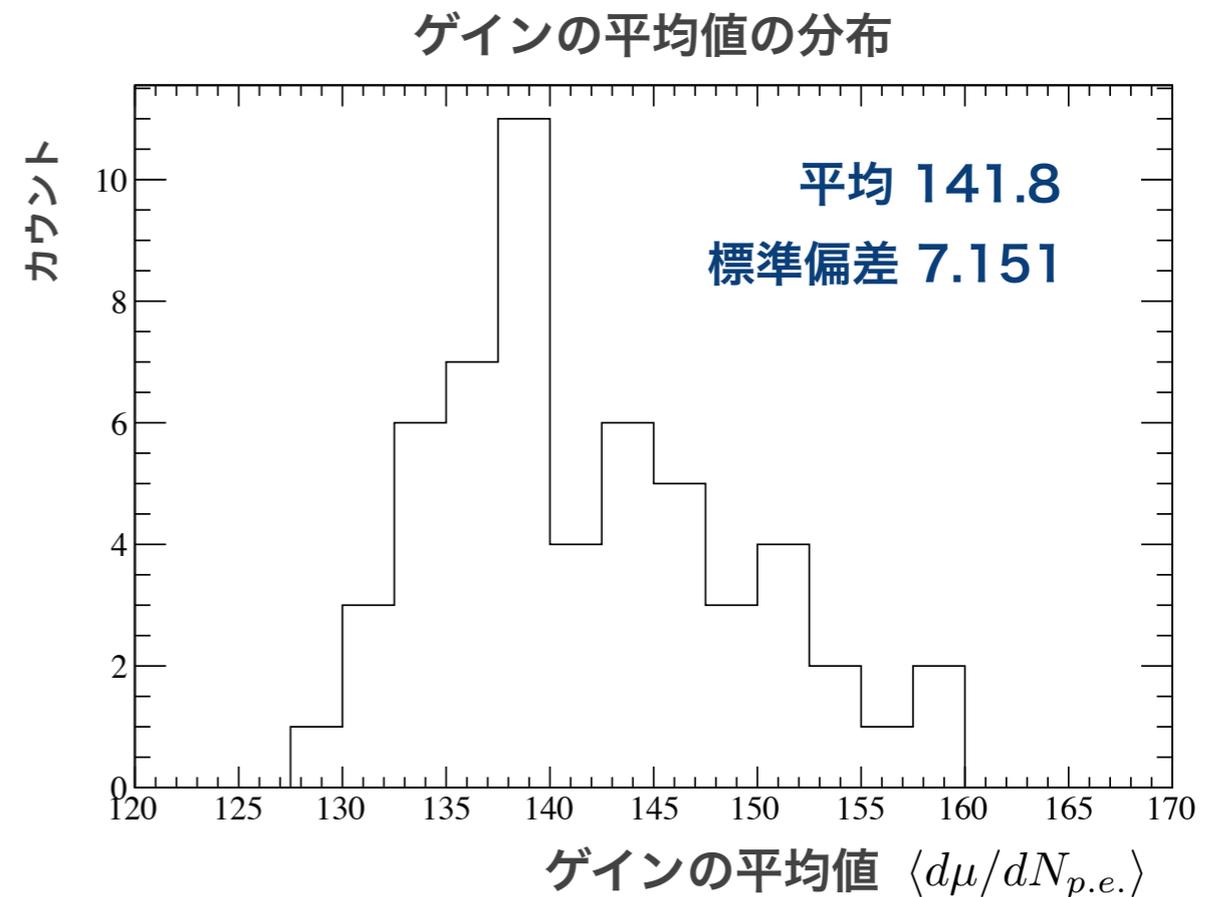
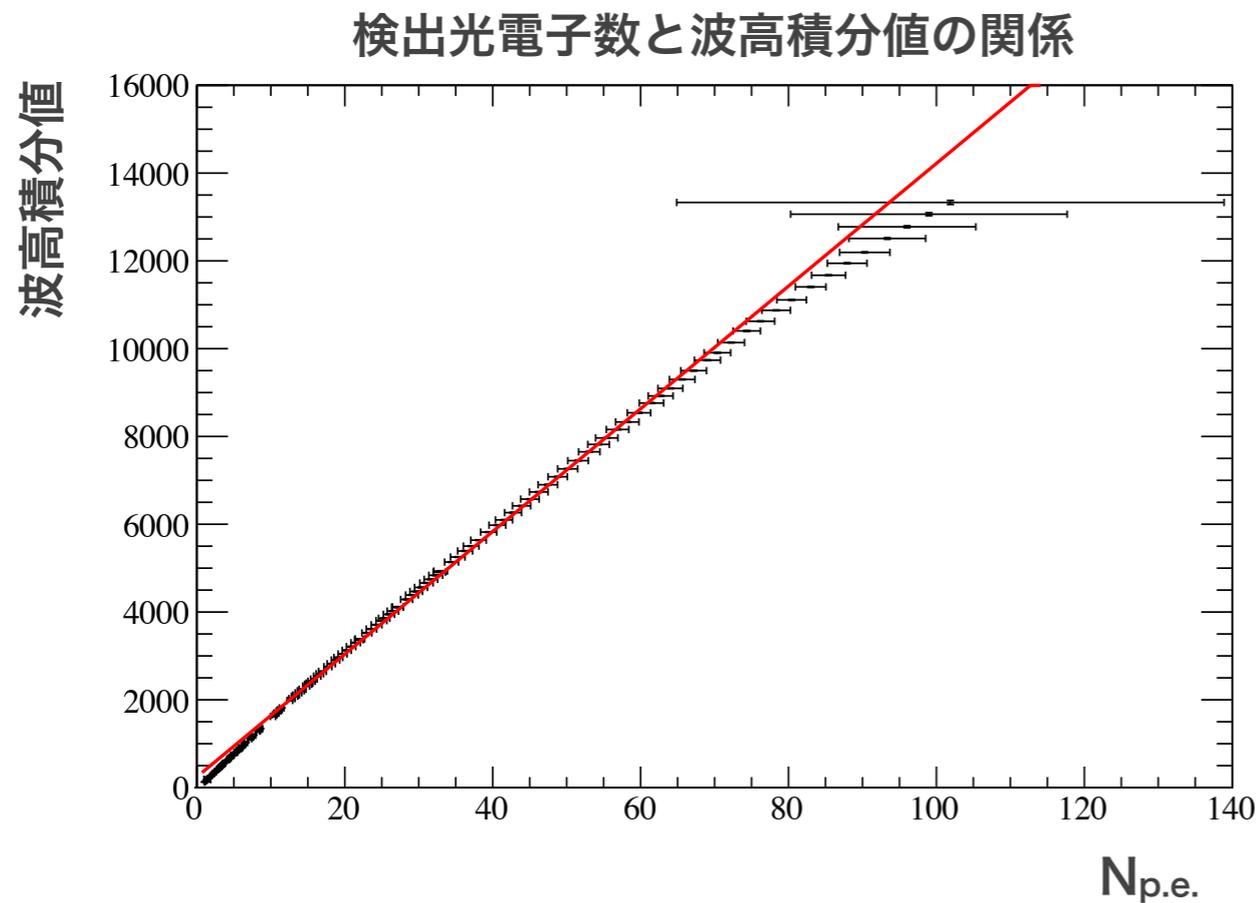
※ ダークカウントでオプティカルクロストークレートを決定し補正した

波高積分値の分布



ゲイン特性

- ▶ LED を使用して64 画素一括でゲイン特性を測定した
- ▶ 各画素のゲインは約 5%程度のばらつきで揃っている
- ▶ 今後この関係を用いて電荷分解能の測定を行う



まとめ

- ▶ 平均と分散の関係から光電子数を導出し、出力波形と検出光電子数の関係を決定した
 - LED を使用して全画素一括でゲイン特性を測定した
 - 各検出光電子数に対する電荷分解能を決定する
 - サンプリングタイミングを較正し電荷分解能を改善する
 - サイン波と LED それぞれを使用した場合での測定精度を比較する

- ▶ SiPM アレイを使用する際の画素間のオプティカルクロストークを測定した
 - 保護層表面で反射された光による周辺画素へのオプティカルクロストークが生じる
 - 保護層を厚くすることで同一画素でのオプティカルクロストークは減少するが、周辺画素へのオプティカルクロストークが上昇する
 - オプティカルクロストークの変化を光線追跡シミュレーションで確認する
 - 画素間のオプティカルクロストークによる角度分解能への影響をシミュレーションする必要がある