

CTA 報告121:ガンマ線望遠鏡 CTA における SiPM の多チャンネル同時較正

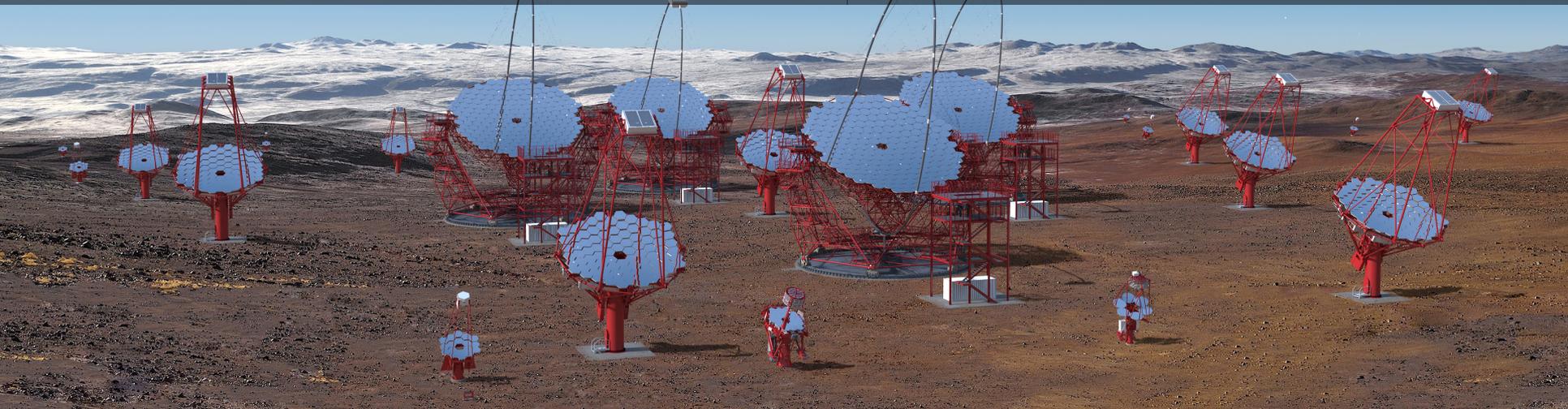
中村 裕樹、奥村 暁、片桐 秀明^A、重中 茜^A、
田島 宏康、山根 暢仁、他 CTA Consortium

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (ISEE)、茨城大理^A

2017 年 3 月 18 日 日本物理学会

Cherenkov Telescope Array (CTA)

	大口径望遠鏡 (LST)	中口径望遠鏡 (MST)	Schwarzschild-Couder Telescope (SCT)	小口径望遠鏡 (SST)
口径	23 m	12 m	9.6 m	~4 m
エネルギー	20 GeV – 200 GeV	100 GeV – 10 TeV	200 GeV – 10 TeV	5 TeV – 300 TeV
台数	4 (北)+ 4 (南)	15 (北)+ 25 (南)	25 (南)	~90 (南)



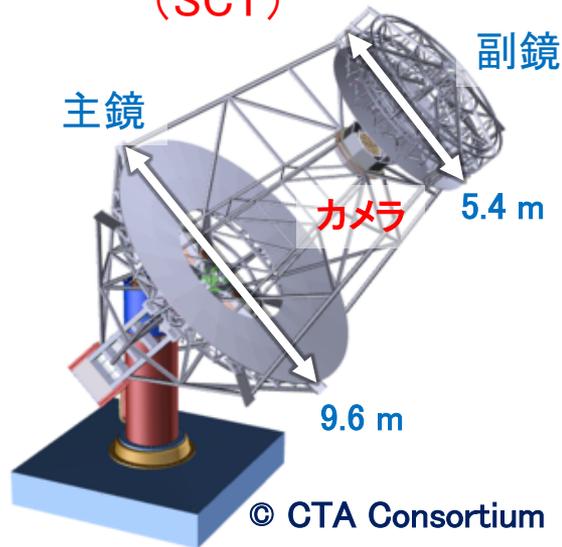
▶ 小・中口径望遠鏡

多数の望遠鏡を配置することで高エネルギーガンマ線の観測を狙う
→ 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

SC光学系を用いた小・中口径望遠鏡

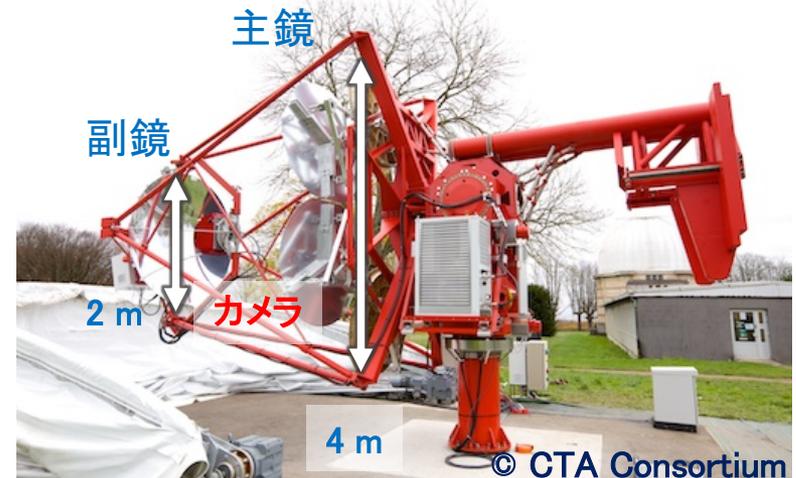
- ❖ 小・中口径望遠鏡の一部では Schwarzschild-Couder 光学系 (SC光学系) を採用する
- ❖ 副鏡により焦点距離が短縮され焦点面カメラの小型化を実現
→ 一台あたりの費用が低くなり望遠鏡を多く設置できる

Schwarzschild-Couder Telescope (SCT)



エネルギー : 200 GeV - 10 TeV
視野 : 8°
台数 : 25 台

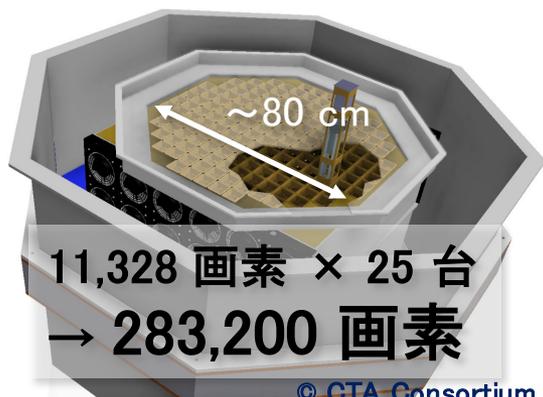
Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT)



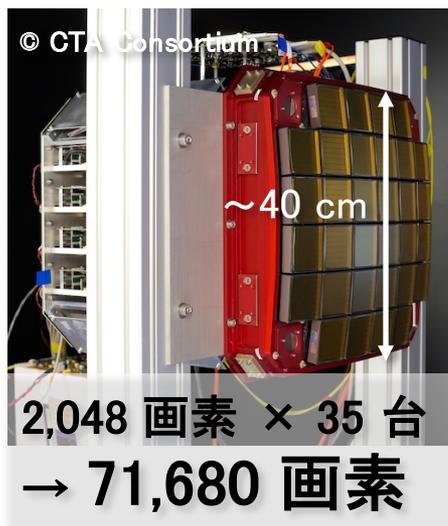
エネルギー : 5 TeV - 300 TeV
視野 : $\sim 9^\circ$
台数 : 35 台

焦点面カメラ

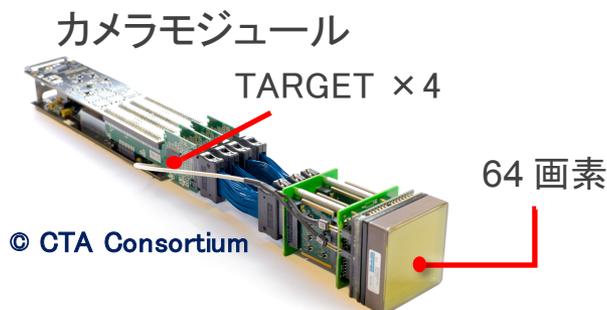
焦点面カメラ(SCT)



焦点面カメラ(GCT)



- ❖ 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検出器(SiPM)を使用
- ❖ SiPM、前置処理回路それぞれ単体での較正方法は確立されている
- ❖ 全ての 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**一括較正を目指している**
- ❖ 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のものを使用)



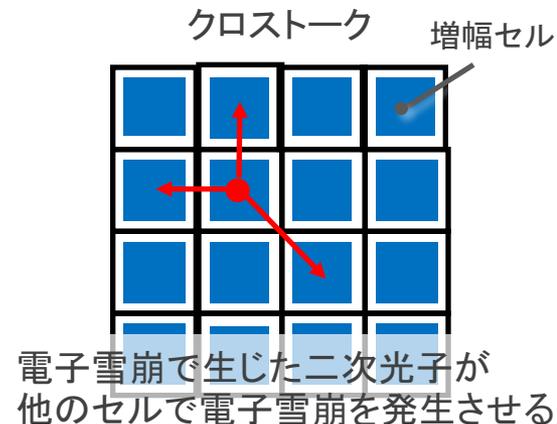
※ 試作機のため光検出器には MAPMT を使用

光検出器と波形記録回路

❖ SiPM の特性

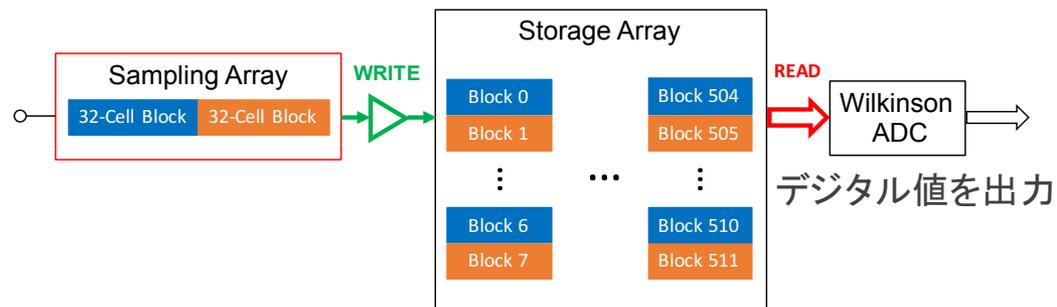
- ・ 高い光検出効率と耐久性
- ・ **オプティカルクロストーク**の発生(以下クロストークと呼ぶ)
→ 単一光電子を複数光電子として検出してしまふ

光電子数を多く見積もってしまうため閾値を下げることができない



- ❖ カメラ小型化のため波形記録回路には多数の読み出しチャンネルを備え、小型かつ低消費電力であることが要求される
→ 専用の集積回路 **TARGET** を開発

- ・ 16 チャンネルの波形記録回路、トリガー回路を備える
- ・ 64 個の波形記録セルを切り替えることでサンプリングする



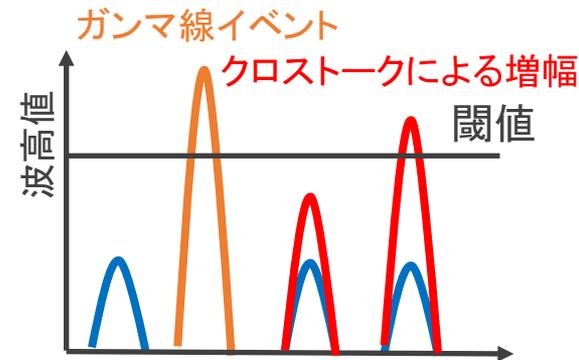
64 個の記録セルは 32 個ごとのブロックに分かれておりサンプリングとデータ書き込みを交互に行っている

光検出器と波形記録回路

❖ SiPM の特性

- 高い光検出効率と耐久性
- オプティカルクロストークの発生 (以下クロストークと呼ぶ)
→ 単一光電子を複数光電子として検出してしまう

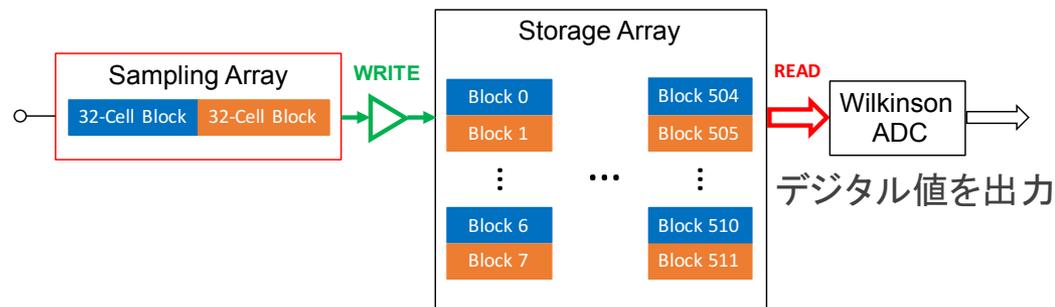
光電子数を多く見積もってしまうため閾値を下げることができない



- ❖ カメラ小型化のため波形記録回路には多数の読み出しチャンネルを備え、小型かつ低消費電力であることが要求される

→ 専用の集積回路 **TARGET** を開発

- 16 チャンネルの波形記録回路、トリガー回路を備える
- 64 個の波形記録セルを切り替えることでサンプリングする



64 個の記録セルは 32 個ごとのブロックに分かれておりサンプリングとデータ書き込みを交互に行っている

焦点面カメラの較正

➤ 較正項目

- サンプルングタイミング (TARGET)
- ゲイン特性 (SiPM + 前置処理回路)
- クロストークレート (SiPM)
- 光検出効率 (SiPM)、トリガースレッシュホールドなど

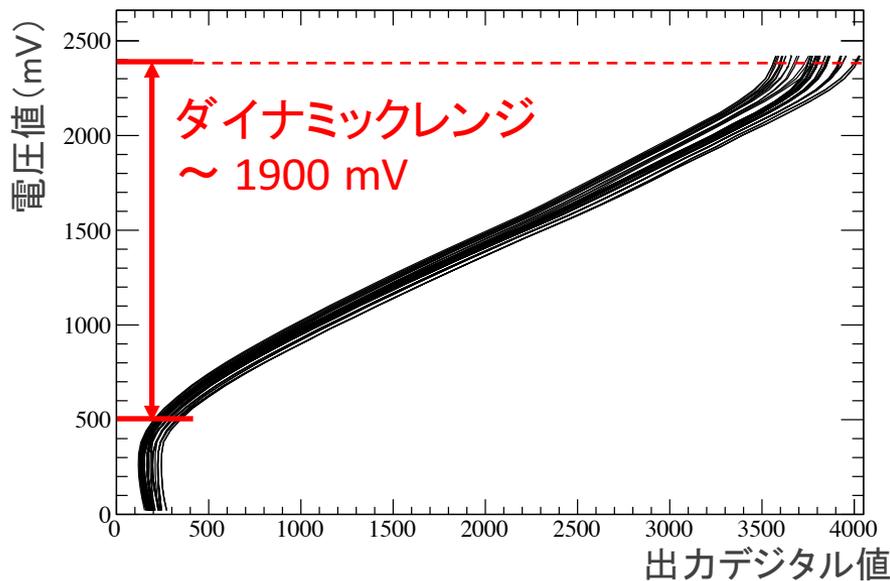
➤ 較正の流れ

1. 伝達関数(電圧→デジタル値)と逆関数(デジタル値→電圧)の測定
TARGET からの出力デジタル値を電圧値へ変換する
2. TARGET のサンプルングタイミングの較正
波形記録セルの切り替えのタイミングにはずれがある → 波形に歪みが生じる
各記録セルのずれを測定し補正する
3. ゲイン較正
印可電圧に対する 1 光電子の波高を測定する
4. クロストークレートの推定

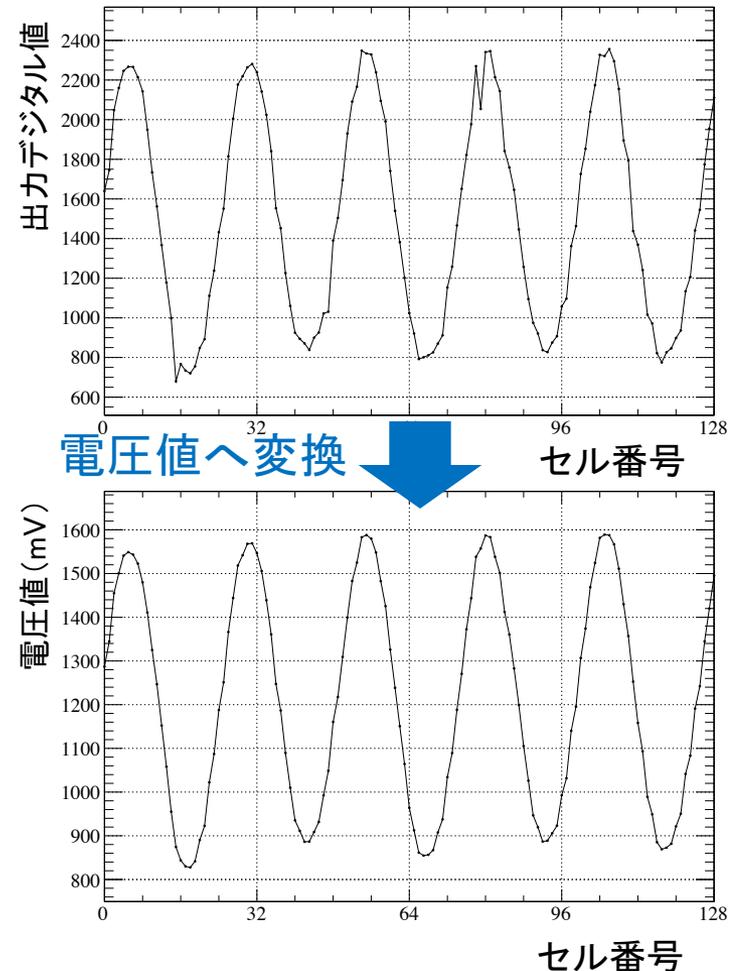
1. 伝達関数 (電圧→デジタル値) と逆関数 (デジタル値→電圧)

- ❖ 出力デジタル値から電圧値を得るため各デジタル値に対する電圧値を測定する

0 から 64 チャンネルのセル0の
出力デジタル値と電圧値の逆関数



- ❖ 逆関数を記録セルごとに測定し
出力デジタル値から電圧値に変換する

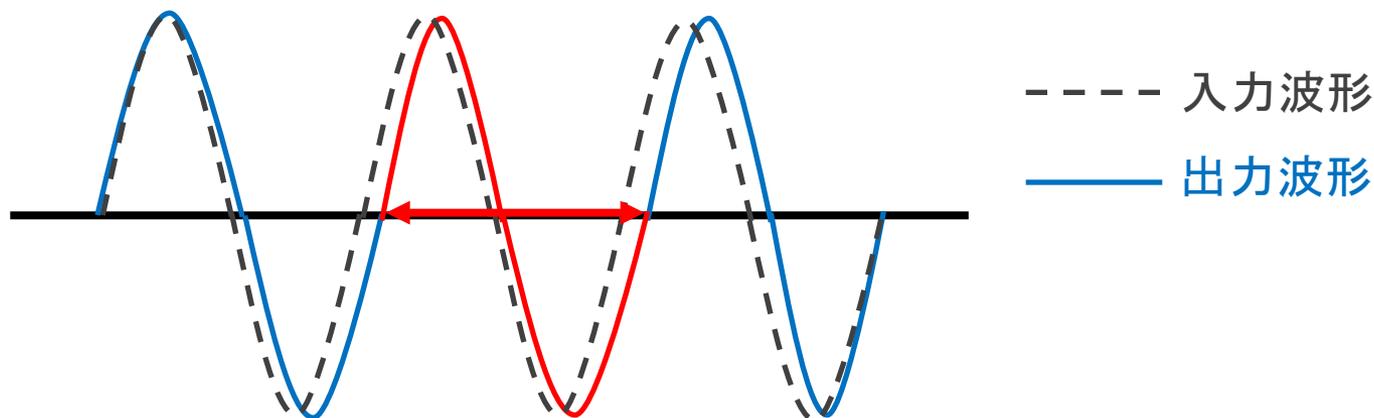


2. サンプリングタイミングの較正

❖ サイン波での測定は確立されている → 2016年春季物理学会 重中講演

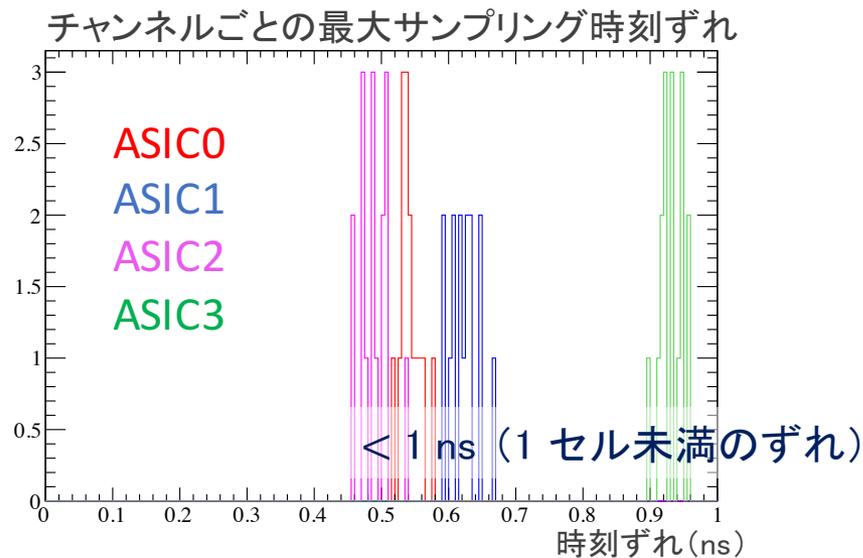
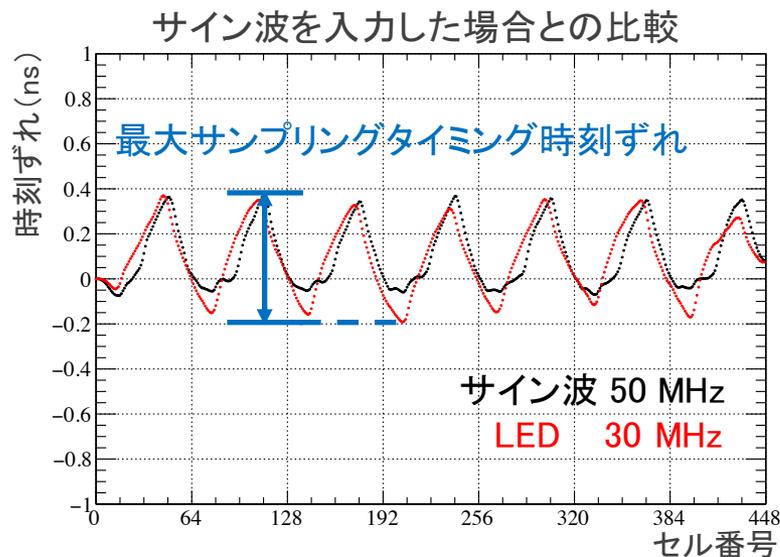
測定方法

周期的な信号を入力し出力波形の周期を測定
→ 入力信号との周期の差から補正值を決定する



2. サンプリングタイミングの較正

- ❖ サイン波での測定は確立されている → 2016年春季物理学会 重中講演
- ❖ カメラとして一括較正する
新たな回路を追加することは避けたい、望遠鏡に設置した状況でも行いたい
→ LED によって周期的な光を照射して行う



期待される64セル周期は見えている → 時刻ずれの測定ができている

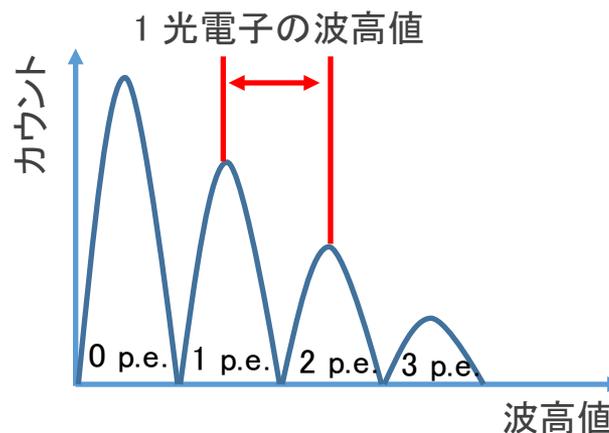
サイン波による測定とずれがある

→ 測定精度が電荷分解能にどの程度影響があるのか見積もる必要がある

3. ゲイン較正

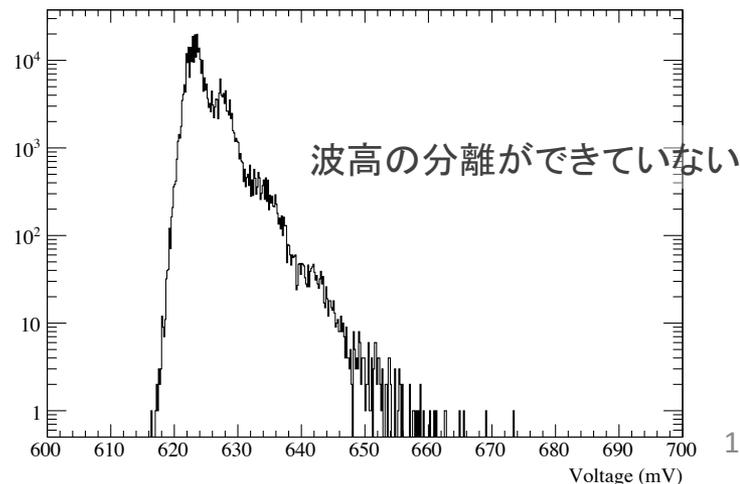
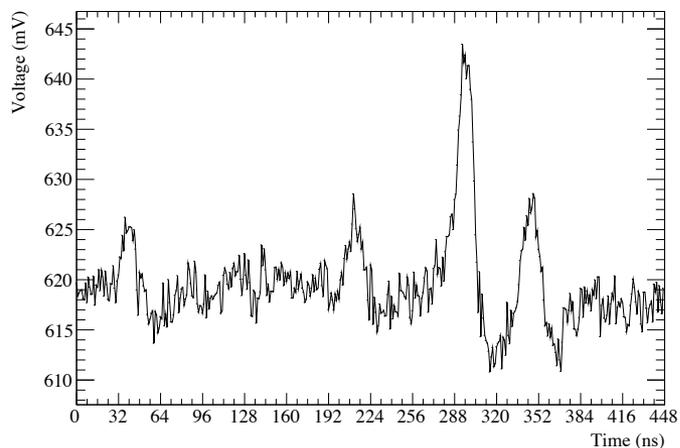
- ❖ 観測時にはSiPM のゲインを揃える必要がある
- ❖ 印加電圧ごとに1光電子検出時の波高値を波高分布より決定する
- ❖ 得られる信号はノイズによって乱れている
→ 波高値を読み間違ってしまう
- ❖ 波形解析によってノイズを低減し波高値を正しく読み取る必要がある

1光電子と2光電子のピークの差から
1光電子の波高値を推測



波高分布

取得した SiPM の波形



波形解析

❖ コンボリューション

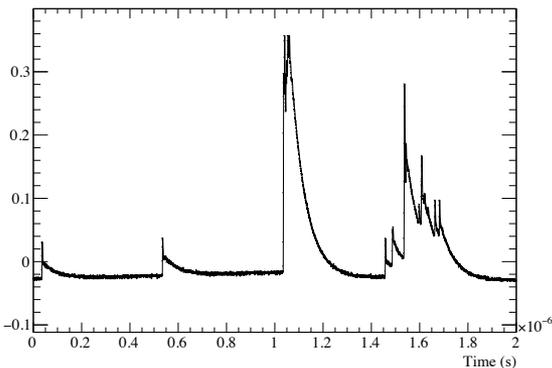
測定によって得られる波形 $s(t)$ は δ 関数列状の入力 $x(t)$ を応答関数 $r(t)$ で畳み込まれたものである

❖ デコンボリューション

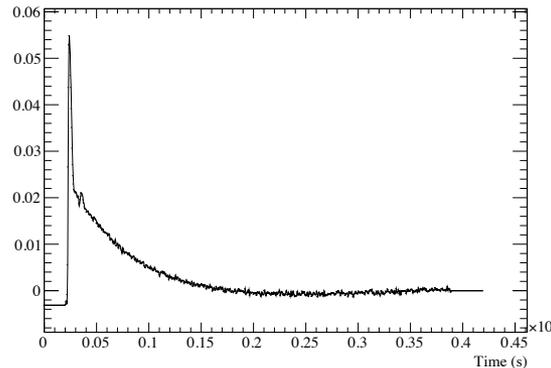
応答関数 $r(t)$ がわかれば波形 $s(t)$ から入力 $x(t)$ を得ることができる

オシロスコープによって取得した SiPM の波形による例

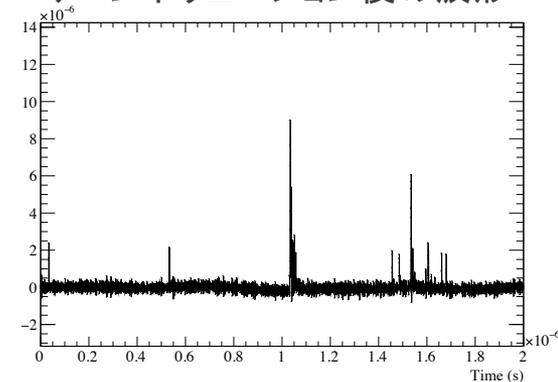
オシロスコープによる取得波形



応答関数



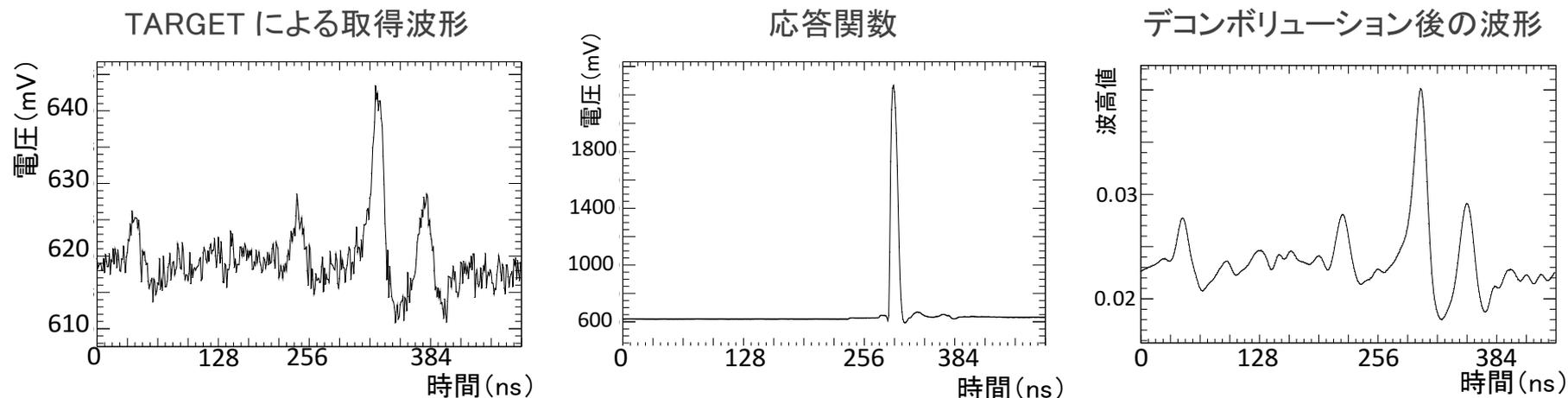
デコンボリューション後の波形



デコンボリューションを用いることで波形の重なりが分離でき波高値を正しく読み取れる

波形解析

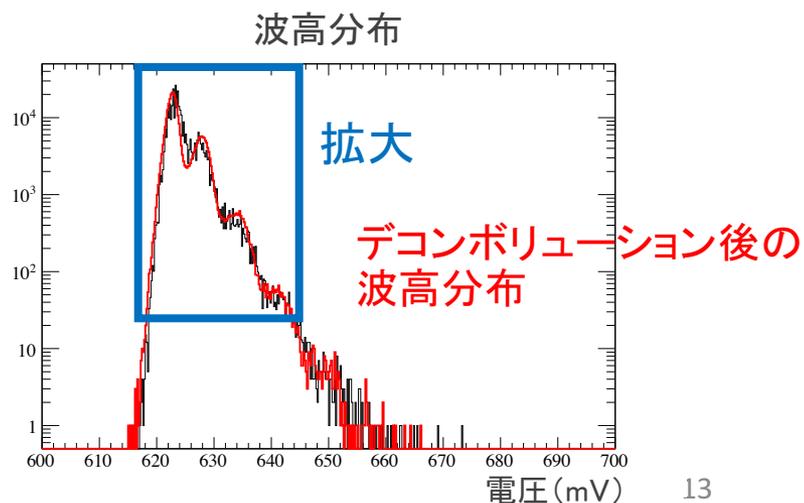
❖ TARGET を用いて取得した SiPM の波形のデコンボリューション



デコンボリューションによって応答関数より高周波成分がカットされる

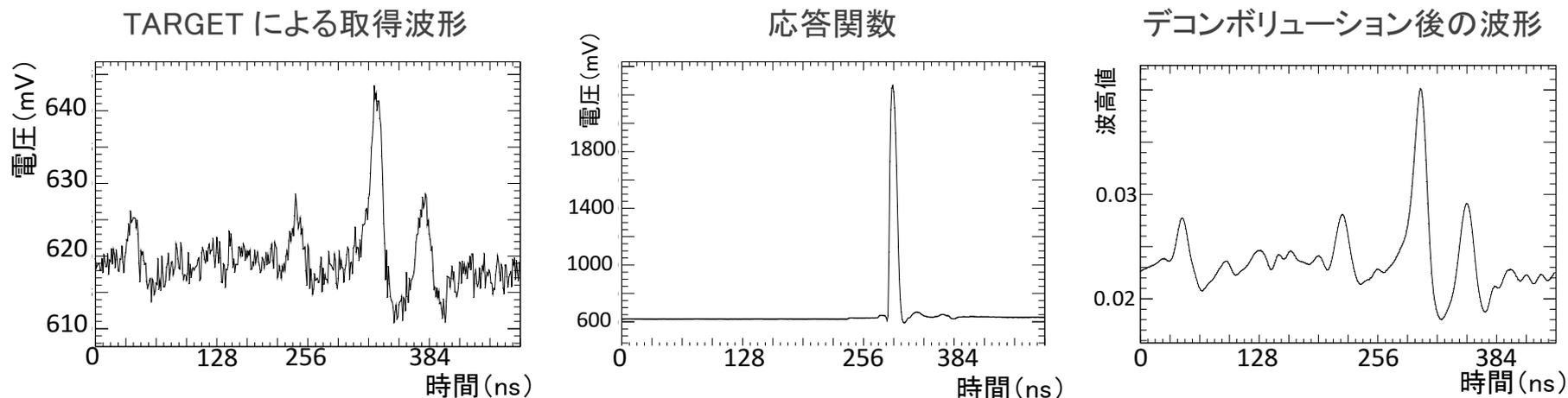
→ 波高分布のピーク分離が改善される

❖ 波高分布をガウス分布でフィットし波高値を決定する



波形解析

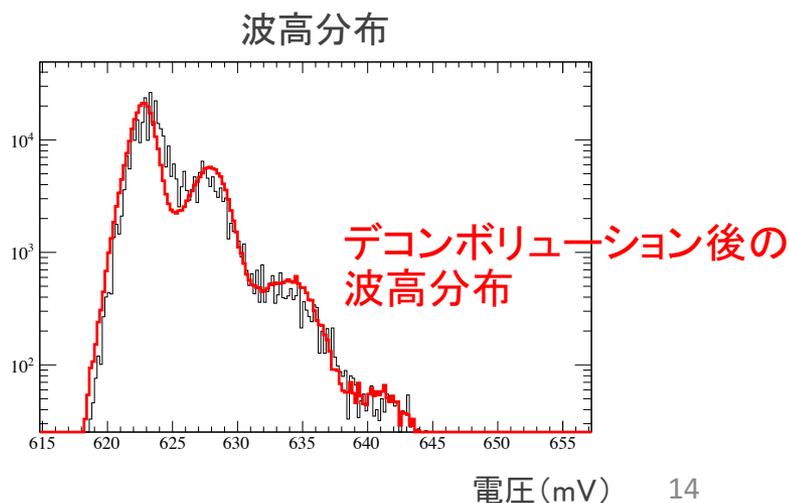
❖ TARGET を用いて取得した SiPM の波形のデコンボリューション



デコンボリューションによって応答関数より高周波成分がカットされる

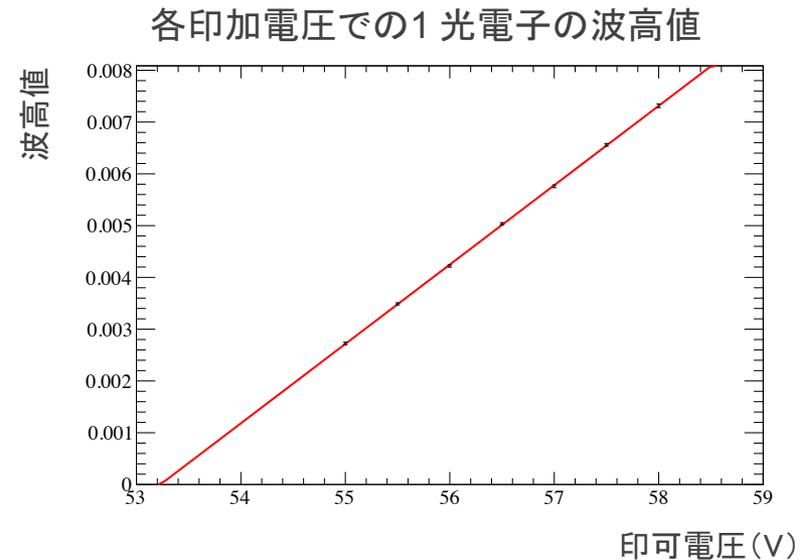
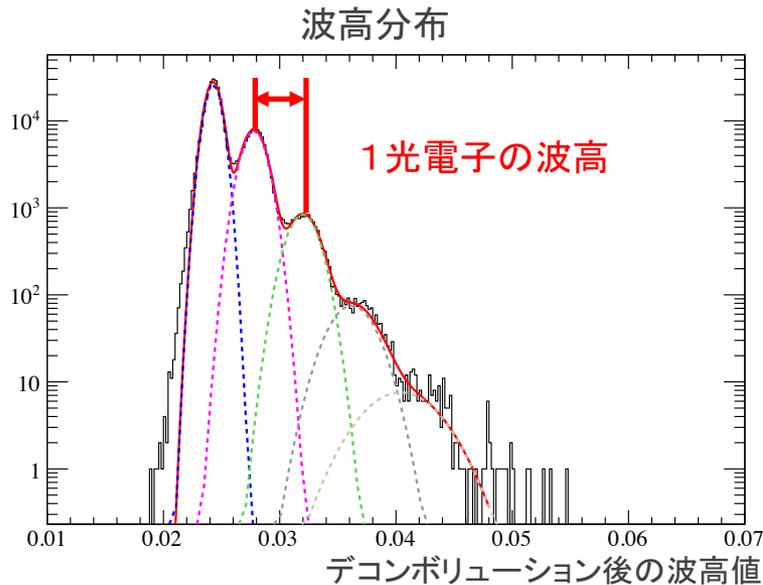
→ 波高分布のピーク分離が改善される

❖ 波高分布をガウス分布でフィットし波高値を決定する



波高値の印可電圧依存性

- ❖ 各印可電圧に対して波高分布をガウス分布でフィットし1光電子の波高値を決定した



- ❖ 印可電圧に比例する結果が得られた → 波高が正しく推定できている
- ❖ この印可電圧に対する波高値をもとにゲインの調整、スレッシュホールドの設定を行う

4. クロストークレート

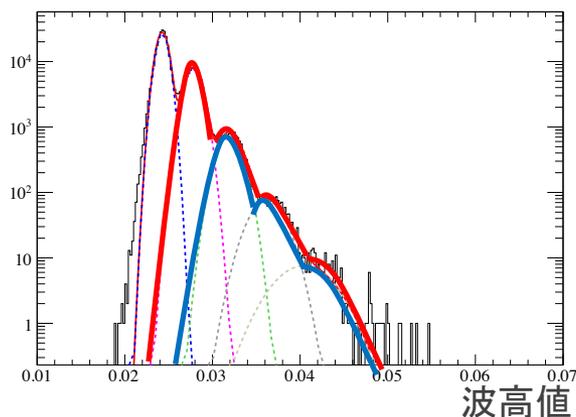
オシロスコープによる 1画素の測定は確立されている → 2016年秋季物理学会 山根講演

LED を照射していない状態ではダークカウントのみカウントしているため、2 光電子以上は全てクロストークによるものと仮定できる

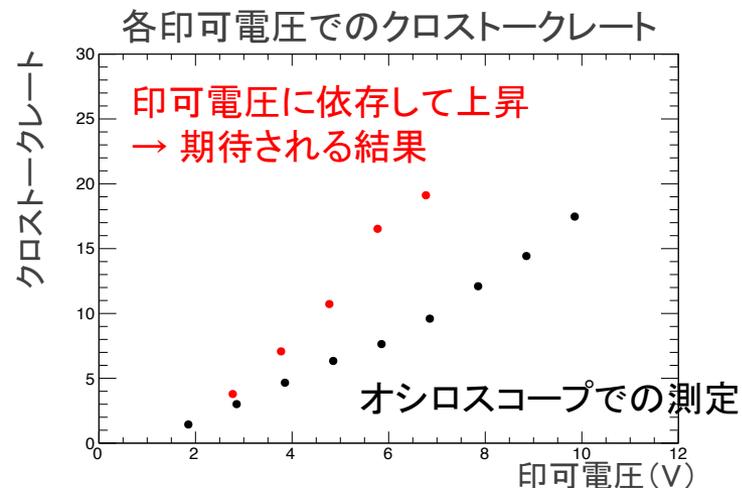
よってクロストークレートを次の式から決定した

$$N_{>2 \text{ p.e.}} / N_{>1 \text{ p.e.}}$$

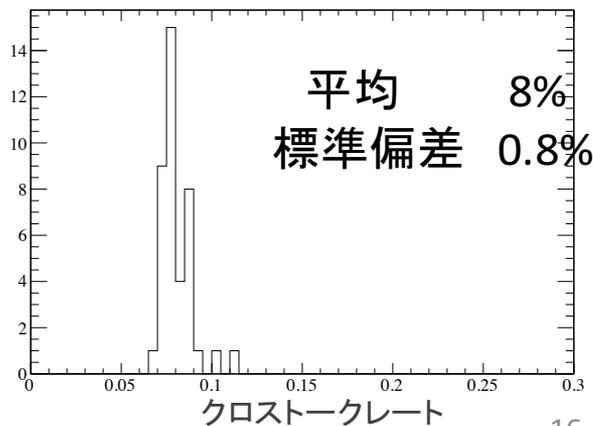
波高分布



64 画素のクロストークレートを一括で測定できた



チャンネルごとのクロストークレートのばらつき (57 V)



まとめ

- ❖ SiPM の信号を TARGET を用いて測定し、波形を解析し印加電圧に対する1光電子の波高値を決定した
→ ゲインの調整、スレッショルドの設定ができる
- ❖ 64 画素の SiPM のクロストークレートを一括で測定した
- ❖ LED を使用して64 チャンネル同時にサンプリングタイミングの較正を行った
→ 期待される 64 セル周期が見られた

今後の課題

- ❖ ゲイン関数の測定
→ 未知の光源を照射し光量推定を行う
- ❖ LED を用いてのサンプリングタイミング較正の改善
測定精度の影響を見積もる