

次世代ガンマ線望遠鏡 CTA で用いる 波形記録回路 TARGET の 時間応答特性の評価

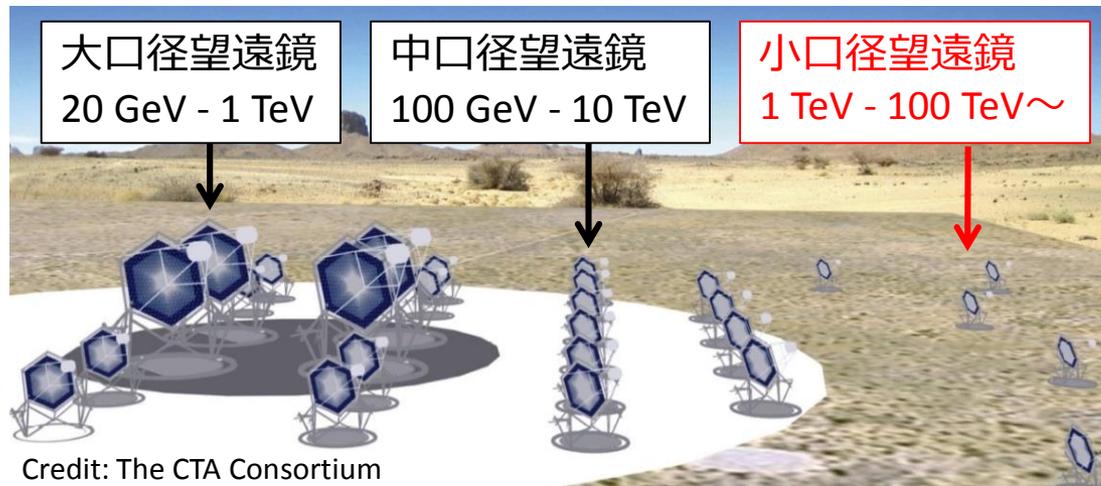
重中茜, 片桐秀明, 田島宏康^A, 奥村暁^{A, B}, 他CTA Consortium
茨城大理, 名大ISEE^A, マックスプランク核物理^B

Cherenkov Telescope Array (CTA)

- ◆ 大中小の大気チェレンコフ望遠鏡アレイによる**ガンマ線観測**計画
- ◆ ガンマ線が大気と相互作用して生じる大気チェレンコフ光を観測
⇒ガンマ線の到来方向、エネルギーを推定

目標

- 20 GeV – 100 TeV以上のガンマ線観測
- 高感度 (従来より1桁以上向上)
- 高角度分解能 (1 – 2 分角) など



各望遠鏡の観測エネルギー帯



ガンマ線観測原理

小口径望遠鏡用 波形記録回路

the Gamma-ray Cherenkov Telescope(GCT)

- 小口径望遠鏡のデザインの一つ
- デュアルミラー光学系:副鏡による焦点面のイメージ圧縮が可能
⇒多チャンネル光検出器を用いたカメラの小型化、コスト削減

焦点面カメラ

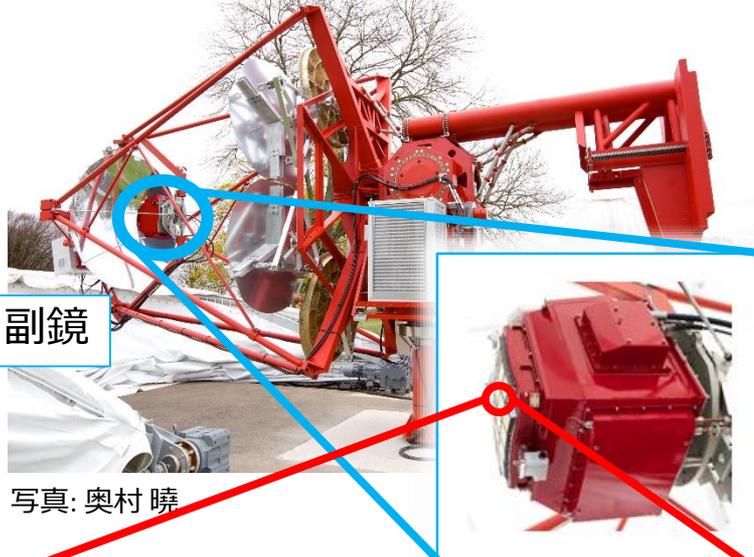
- 64chの光検出器×32本を組み合わせた約2000画素のカメラ

TARGET ASIC

本研究における評価対象

- GCTに使用される波形記録回路
- 低消費電力、コンパクトなデザイン
- 16chの読み出しチャンネル
- サンプリング周波数: 1.0 GHz
⇒大気チェレンコフ光由来の信号(~ns)に対し、ナノ秒単位の高速サンプリングが可能

主鏡



副鏡

写真: 奥村 暁

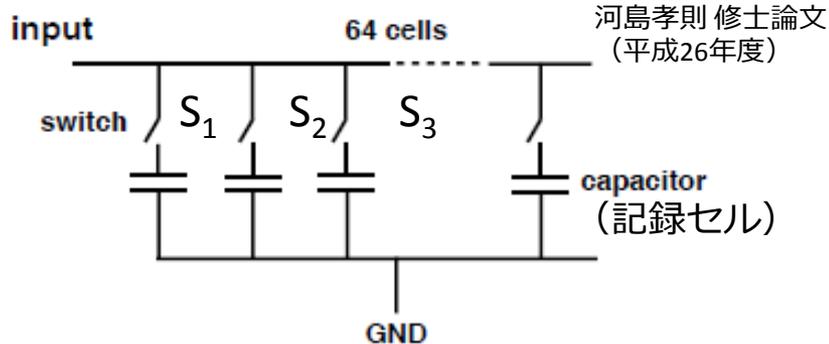
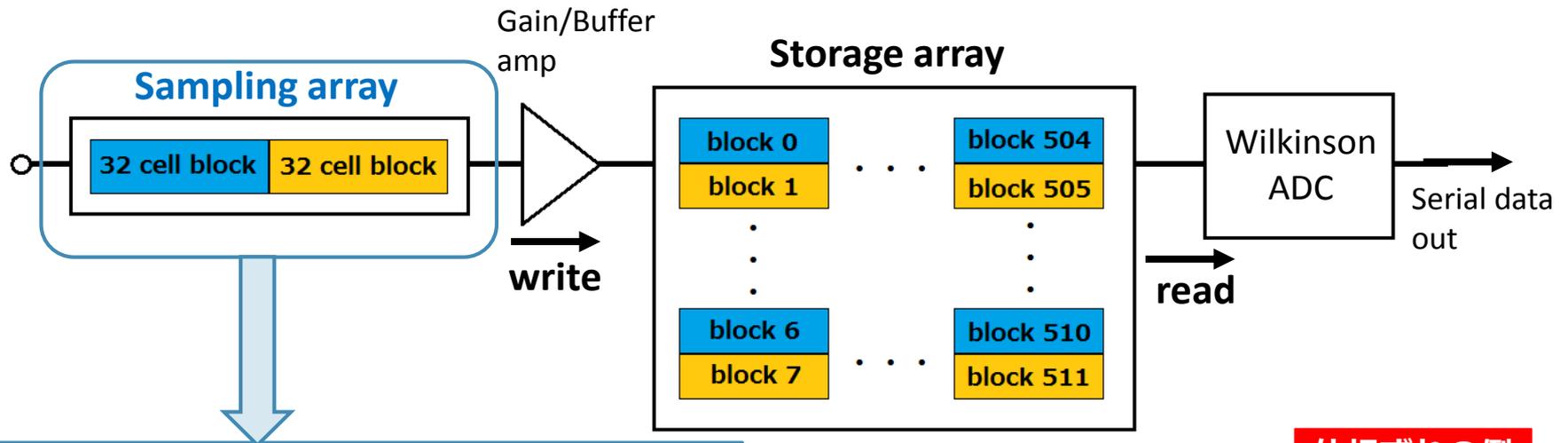
TARGET カメラモジュール



Albert et al. (2016) in prep.

TARGETの時間応答特性

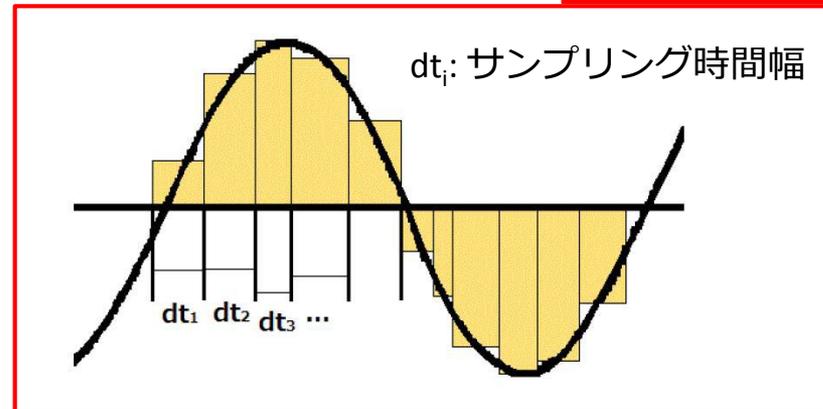
- ◆64 個の波形記録セルの切り替えを繰り返してサンプリング
... 記録セル毎に切り替え時間のばらつき (位相ずれ) がある



河島孝則 修士論文
(平成26年度)

*64セル毎にトリガーを受け取り、
0番目のセルからサンプリングを始める

位相ずれの例

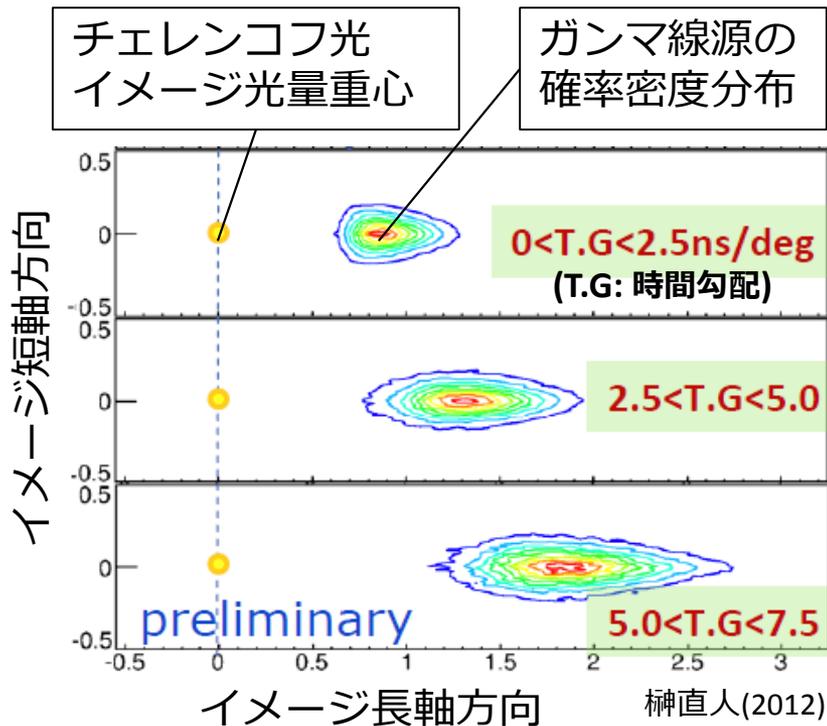


位相ずれ測定のための目的

- ◆チェレンコフ光子の観測タイミングとガンマ線源の距離相関の利用

⇒望遠鏡の**角度分解能の向上**

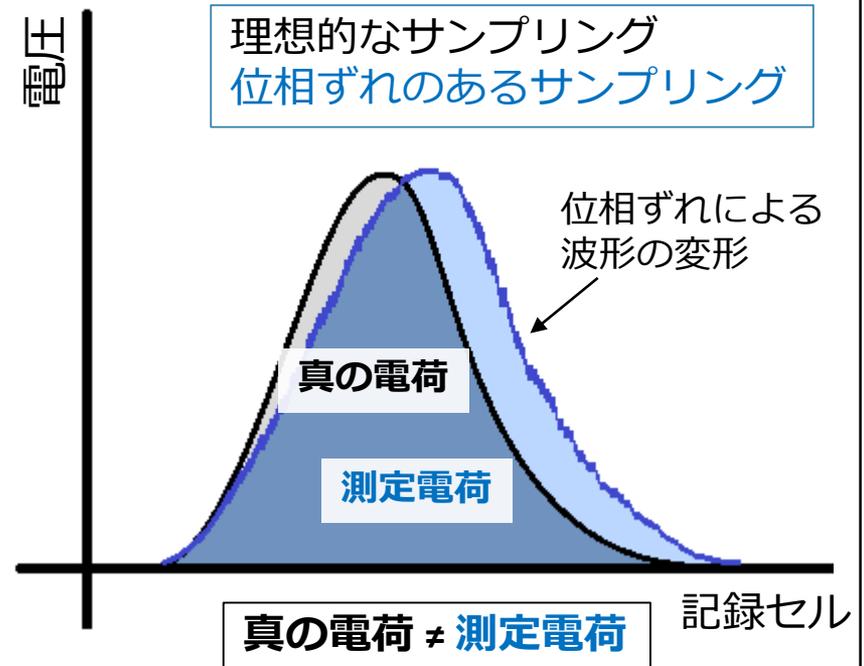
サブナノ秒精度の位相ずれ補正



- ◆位相ずれ補正による電荷分解能改善
*目標: 位相ずれの寄与を要求値(~5%)より十分小さく抑える

⇒エネルギー分解能の向上

位相ずれ補正による真の電荷の算出

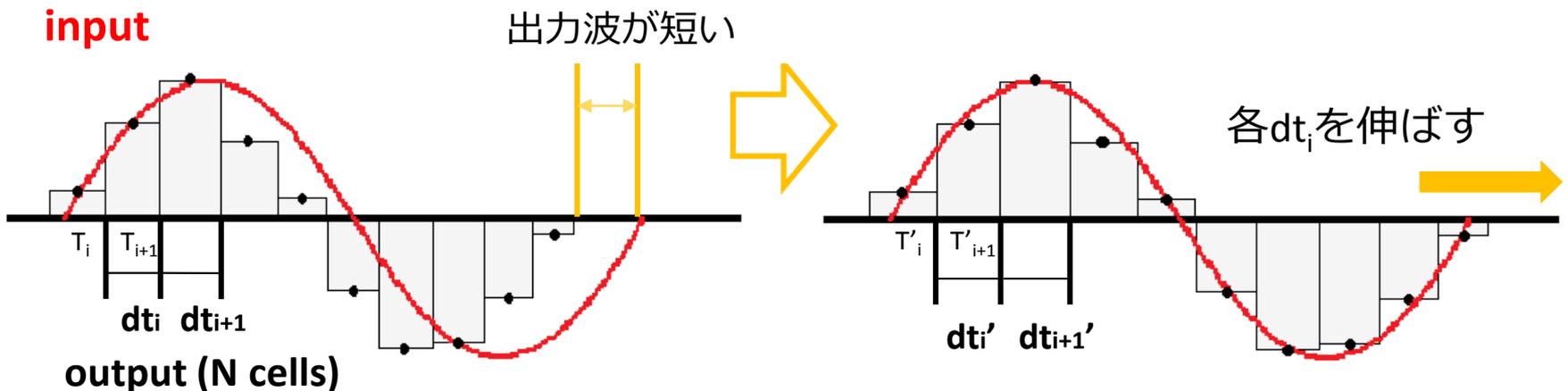


位相ずれ測定方法

- ◆位相ずれにより、記録された波は入力波に比べ周期が歪む
⇒記録波形の位相を補正し、セル毎の補正幅を求める。
= 位相ずれ

測定手順

1. TARGETで50 MHzサイン波を1 GHzサンプリング
2. 記録波形の周期が入力波の周期に近づくように、各セル時間幅を少しずつ補正
3. サイン波の入カタイミングを変え、各セル時間幅が収束するまで上記を繰り返す



位相ずれの算出

4. 時間幅の収束時点で、以下の式にならない位相ずれを求める。

$$\text{時刻位相ずれ} = T'_i - T_i$$

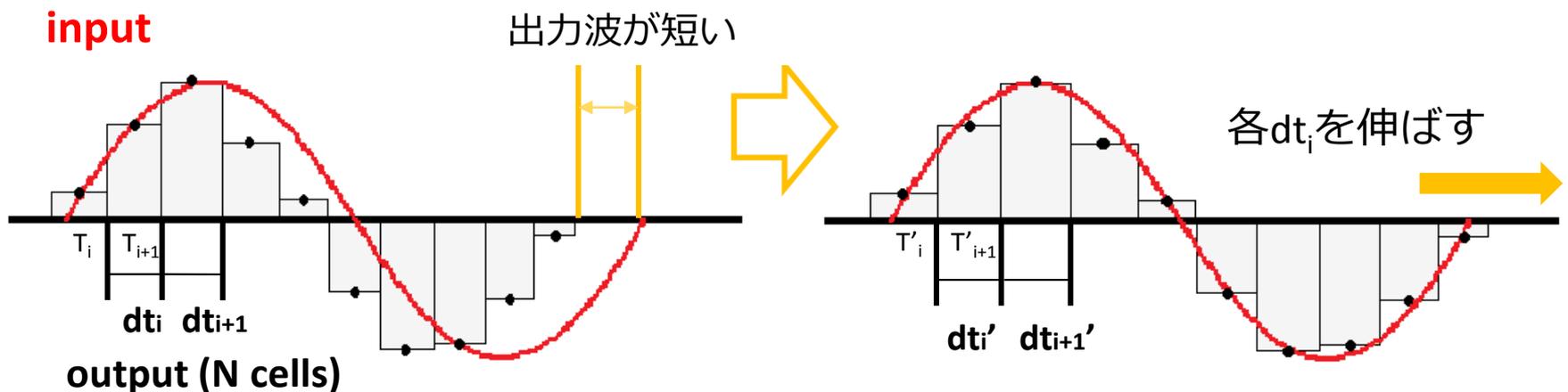
(T : 理想サンプリング時刻)

(T' : 周期補正後のサンプリング時刻)

$$\text{時間幅ずれ} = dt'_i - dt_i$$

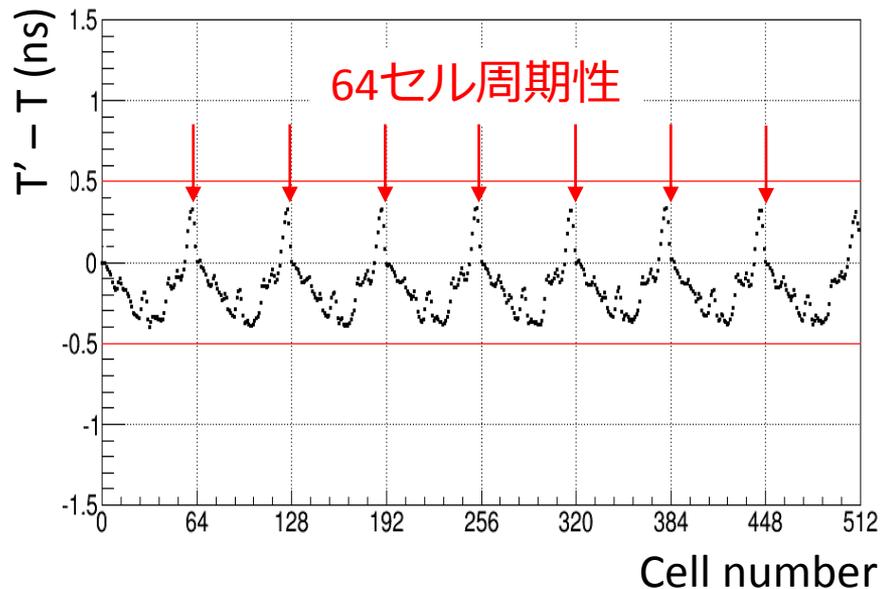
(dt : 理想サンプリング時間幅)

(dt' : 周期補正後のサンプリング時間幅)

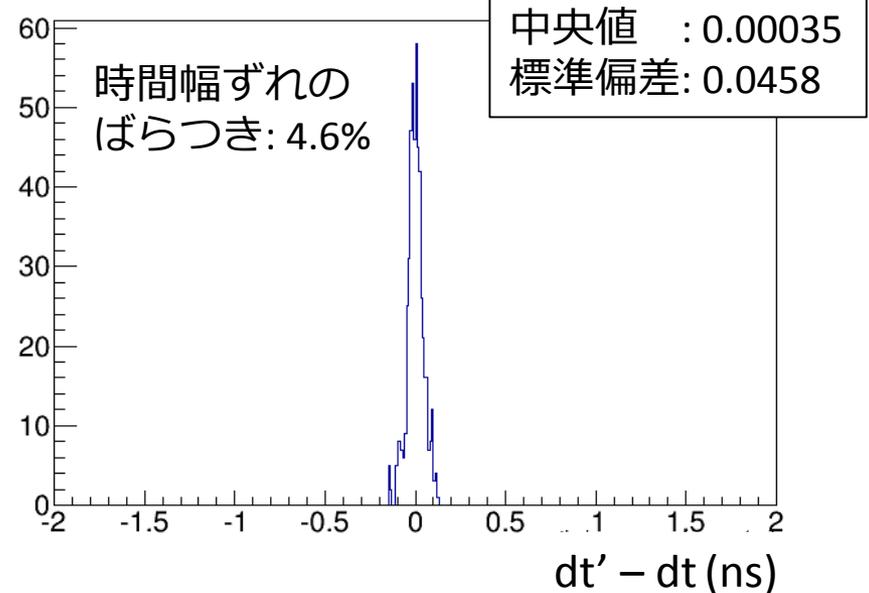


TARGET7 位相ずれ測定結果

サンプリング時刻の位相ずれ



サンプリング時間幅のずれ



サイン波イベント積み重ね数: 30000イベント

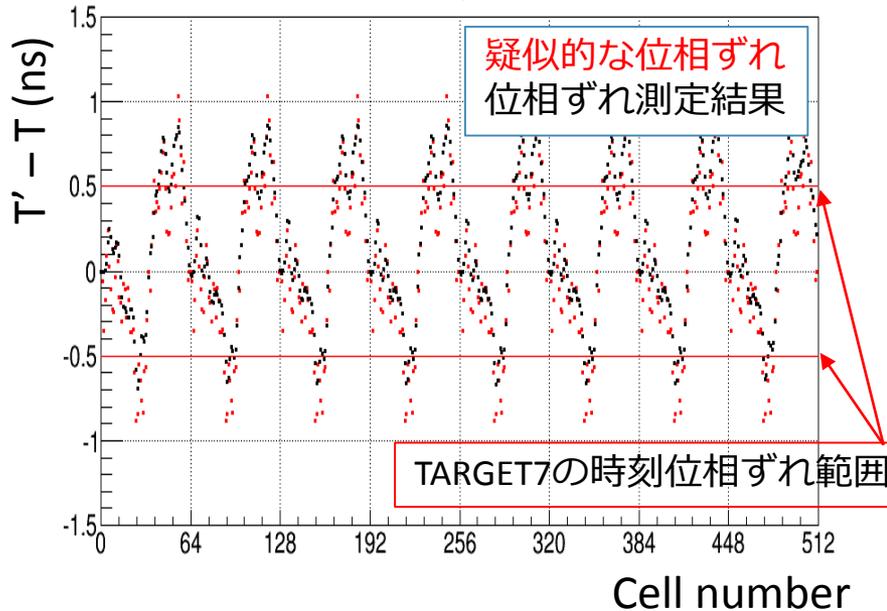
- **64セル毎の周期性**: 構造的に期待できる結果
⇒ **位相ずれが測定できている**
- 最大**時刻**位相ずれ: $< 0.5\text{ns}$ ⇒ 1セル未満のズレ (1GHzサンプリング)
- 最大**時間幅**ずれ : $< \sim 0.15\text{ns}$ ⇒ サンプリング周波数1GHzに対し**十分小**₈

位相ずれ測定精度の検証

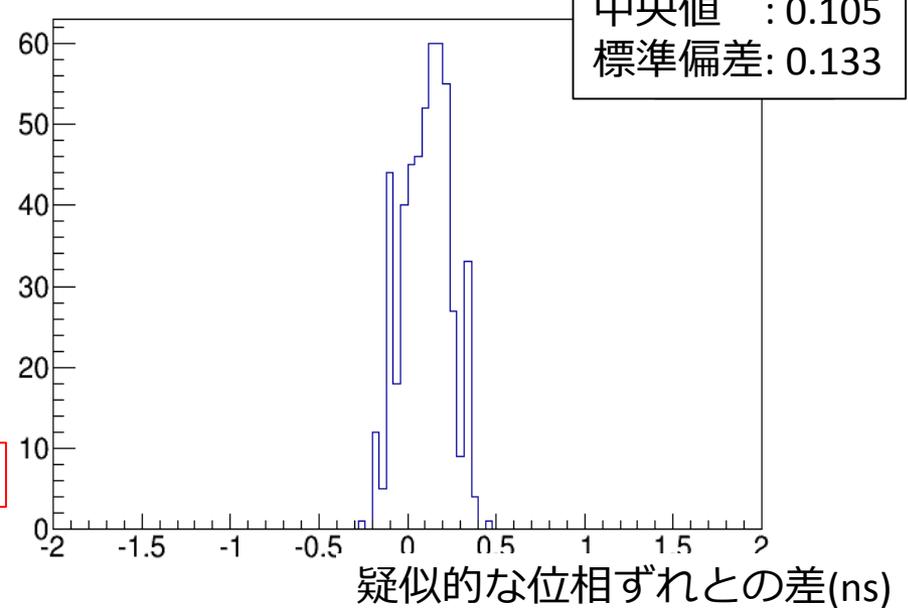
- ◆ 疑似的な位相ずれを持つサイン波を生成し、測定シミュレーション
⇒ **位相ずれの測定精度**を見積もった

* 時間幅ずれ: TARGET7のセル毎時間幅の時間幅ずれより**悪い**、ランダムな **± 0.3 ns**のずれを設定。

サンプリング時刻の位相ずれ



疑似的な位相ずれとの差



- 1GHzサンプリングにおける**位相ずれの測定精度** : 標準偏差 0.13ns
⇒ タイミング解析に十分な値

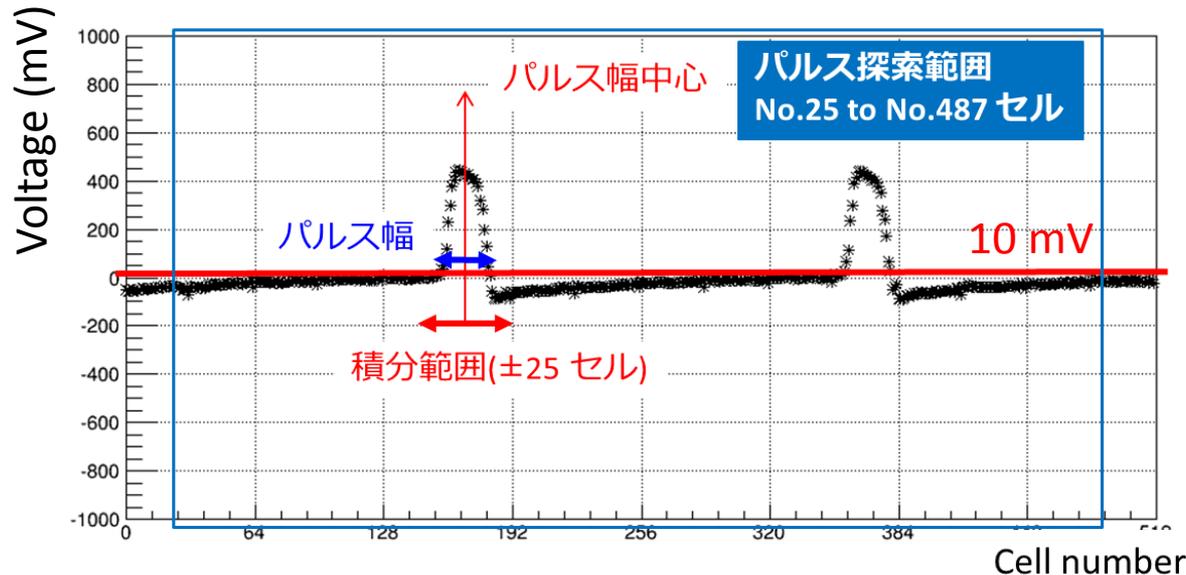
電荷分解能の測定

- ◆位相（時間幅）ずれにより、サンプリングするセル毎に電荷量が変わる
⇒時間幅ずれ補正を行い、電荷分解能の改善を狙う

測定内容

- サンプリング周波数を1GHzに調節
*64セル毎のトリガーと記録セルのサンプリング周波数を合わせる
- TARGET7評価ボードでパルス波をサンプリングし、以下の式よりchargeを求める

$$\text{Charge} = \sum(dt_i \times V_i) \quad (i: \text{セル番号、} dt: \text{サンプリング時間幅、} v: \text{電圧値})$$



TARGET7

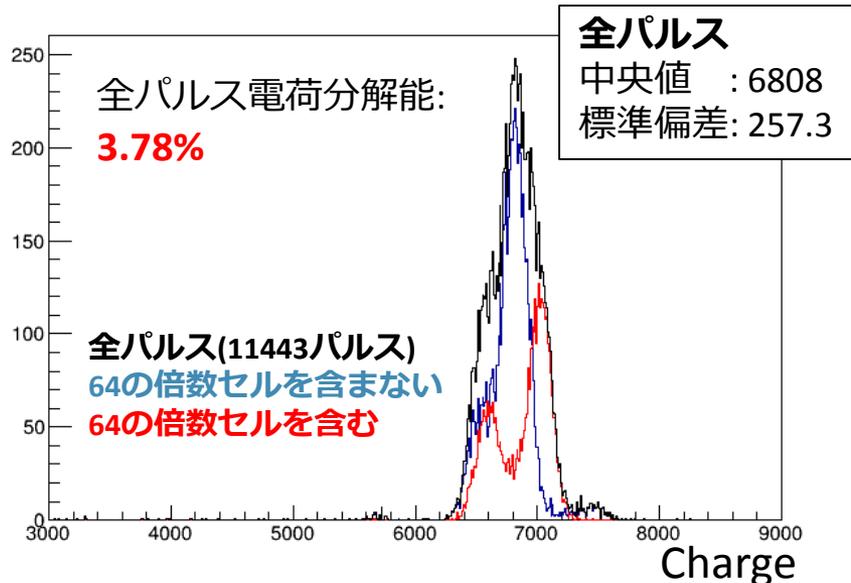
サンプリング周波数: 1.0GHz

入力パルス

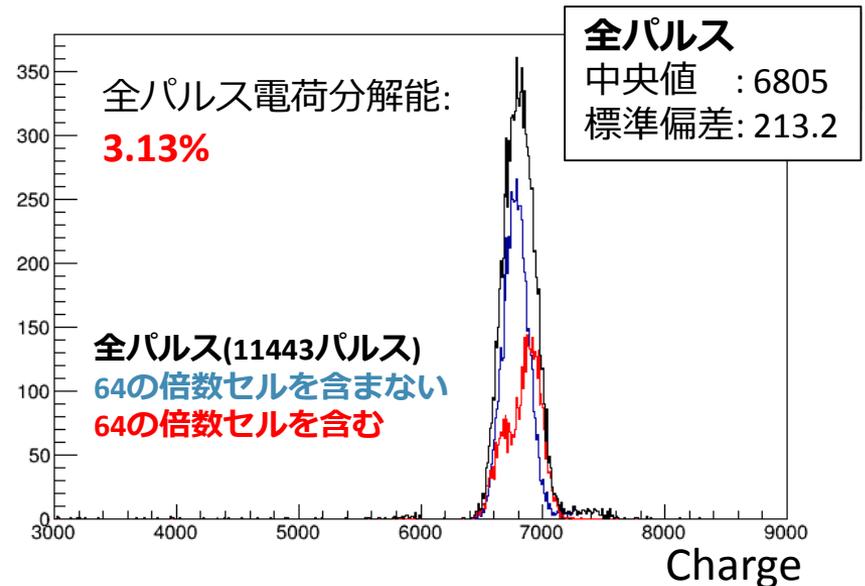
波高: 500 mV
パルス幅: 20ns
立ち上がり時間: 5ns,
入力周期: 200ns

電荷分解能 1.0GHzサンプリング

時間幅ずれ補正前



時間幅ずれ補正後



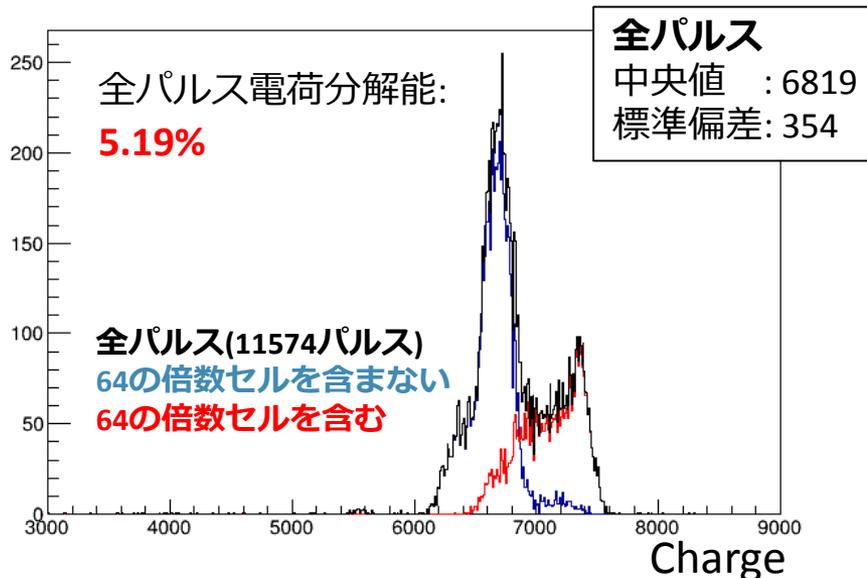
$$(\text{電荷分解能}) = (\text{標準偏差}) / (\text{中央値})$$

- 時間幅ずれの補正により電荷分解能が改善
- 64の倍数セルにより標準偏差が悪くなる: サンプリング周波数が1GHzからわずかにズレている影響

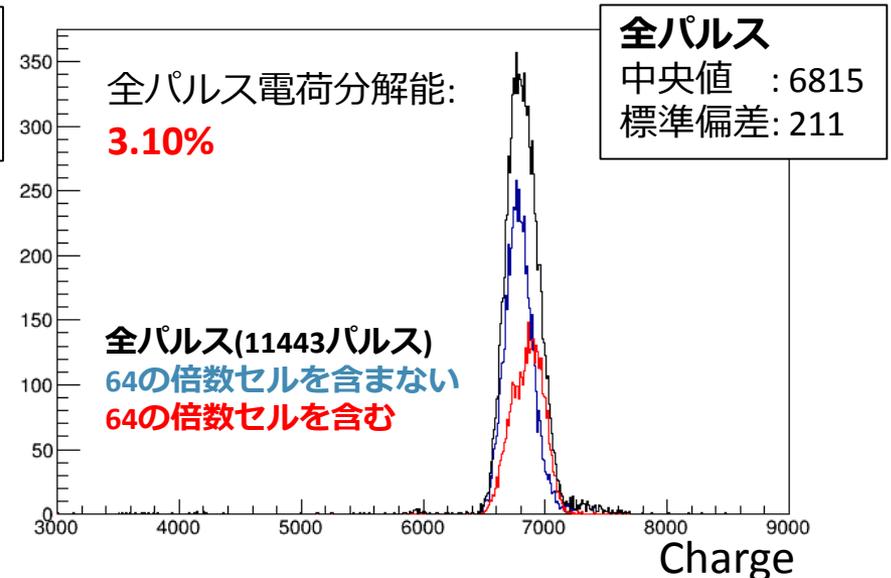
*パルスジェネレータの性能による入力パルス形状の不安定性も含む

電荷分解能 0.98GHzサンプリング

時間幅ずれ補正前



時間幅ずれ補正後



$$(\text{電荷分解能}) = (\text{標準偏差}) / (\text{中央値})$$

- $1 \pm 0.02\text{GHz}$ では、サンプリング周波数ズレに関わらず3%まで改善
⇒サンプリング周波数ズレは時間幅ずれ補正により改善が可能

*パルスジェネレータの性能による入力パルス形状の不安定性も含む

まとめと今後

TARGET7の位相ずれ測定結果

- TARGET7の構造由来の64セル周期性が見られた
⇒位相ずれ測定ができています
- 時刻位相ずれの測定精度 $\sim 0.13\text{ns}$
⇒サブナノ秒達成...タイミング解析に十分な値

位相ずれ補正による電荷分解能の変化

- 64の倍数セルによる電荷分解能の悪化...補正で改善
- 位相ずれ補正の効果⇒電荷分解能改善、サンプリング周波数ズレ修正

今後

- チェレンコフ光信号を模したより短いパルスでの、電荷分解能測定および位相ずれ補正