

CTA大口径望遠鏡用 波形サンプリング回路に用いる アナログメモリDRS4のスパイク特性

岡 知彦

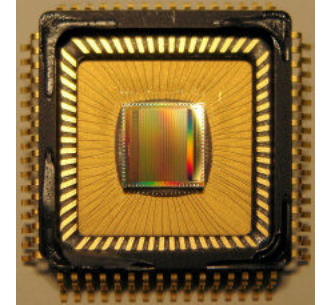
阿部日向^A, 猪目祐介^A, 岩村由樹^A, 大岡秀行^A, 岡崎奈緒^A, 奥村 暁^{B,C},
折戸玲子^D, 片桐秀明^E, 櫛田淳子^F, 窪秀利^A, 郡司修一^G, 小林志鳳^A, 齋藤隆之^A,
櫻井駿介^A, 佐々木寅旭^H, 砂田裕志^H, 高橋光成^A, 立石大^H, 田中真伸^I, 手嶋政廣^{A,J},
寺内健太, 寺田幸功^H, 門叶冬樹^H, 橋山和明^A, 中森健之^G, 西嶋恭司^F, 野上優人^E,
野崎誠也, 野田浩司^A, Daniela Hadasch^A, Daniel Mazin^{A,J}, 山本常夏^K,
吉田龍生^E, 他CTA-Japan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

京大理

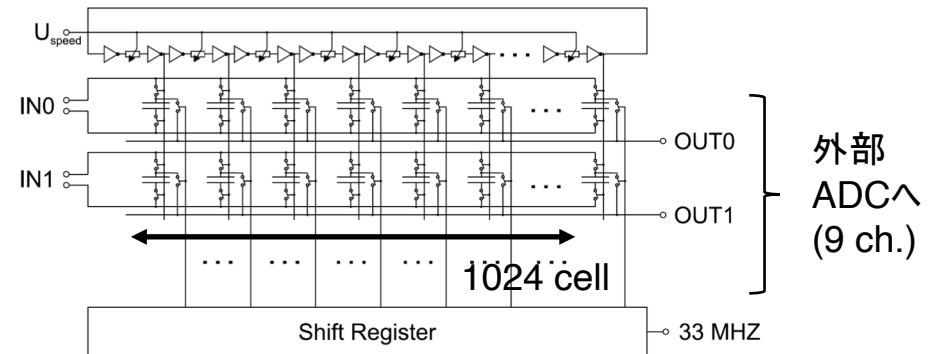
東大宇宙線研^A, 名大ISEE^B, 名大KMIC^C, 徳島大理工^D, 茨城大理^E, 東海大理^F,
山形大理^G, 埼玉大理^H, KEK素核研^I, マックスプランク物理^J, 甲南大理工^K

Domino Ring Sampler (DRS)

- ☑ Switched Capacitor Arrays
を用いたアナログメモリ
- ☑ MEG実験用にPSI(スイス)にて開発
→ 我々が推進するCTA計画含め
多くの実験で使用例有り
- ☑ 2007年よりV4が生産開始
 - 高速サンプリング: 0.7–5 GS/s
 - 1024 キャパシタ × 9チャンネル
 - 低消費電力: ≤ 40 mW/チャンネル



波形電荷の取得、0.2-2 nsで切り替え



- ☹ 電磁雑音のベースラインがイベント毎に変動 [J.Sitarek+2013]
- ☹ あるパターンで偽パルス信号 (スパイク現象) が起こる [開発者S.Ritt氏より一部言及有]

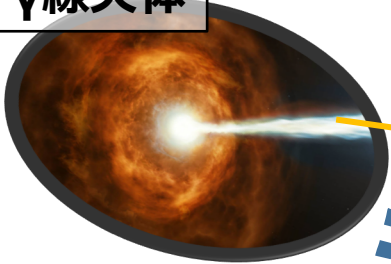
非常に優れた性能を持つ一方、癖があり、使用には電磁雑音の十二分な理解が必要
本講演ではCTA大口径望遠鏡の運用において現れるスパイク事象とその対処法について報告

次世代 γ 線天文台CTA: 大口径望遠鏡

4台+4台 (北・南半球) からなる23m大口径の大気チェレンコフ望遠鏡群により、宇宙全天からの20 GeV以上 ($\lesssim$ TeV) の γ 線を現行より1桁優れた感度で観測

CTA計画ではさらに12m・4m口径の望遠鏡合わせ計100台の望遠鏡群となる (20 GeV–300 TeV)

γ 線天体



© NASA, ESA & M. Kornmesser

γ -ray

電磁シャワー

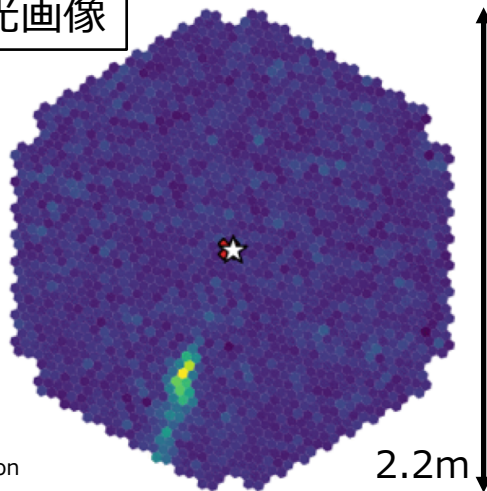
$e^\pm$

γ

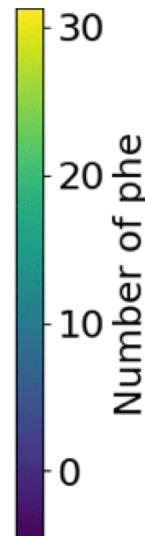
$e^\pm$

大気

初号機で捉えた
チェレンコフ光画像



© R. López-Coto,
LST Collaboration
(一部改変)



Number of phe

スペイン・カナリア諸島
ラパルマ島

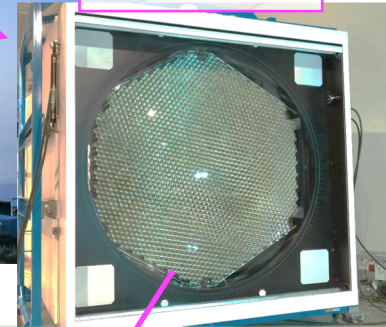
大口径望遠鏡初号機
(2018年完成)



チェレンコフ
光

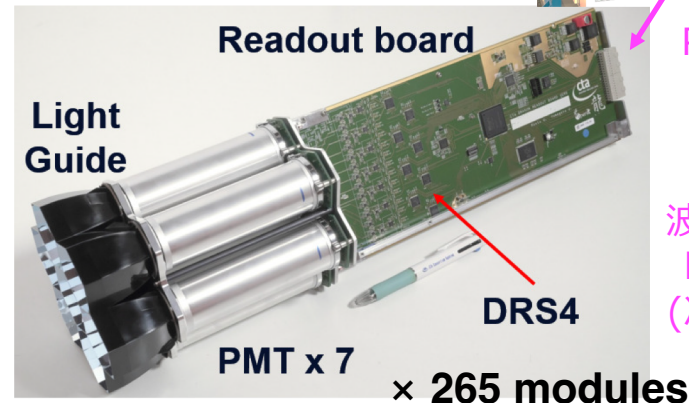
© CTAO & T. Inada

焦点面カメラ



PMT1855本
で構成

波形読み出しに
DRS4を使用
(次ページ詳細)



Readout board

Light
Guide

PMT x 7

DRS4

x 265 modules

焦点面カメラ読み出し回路 Dragon

波形読み出しへの主な要求

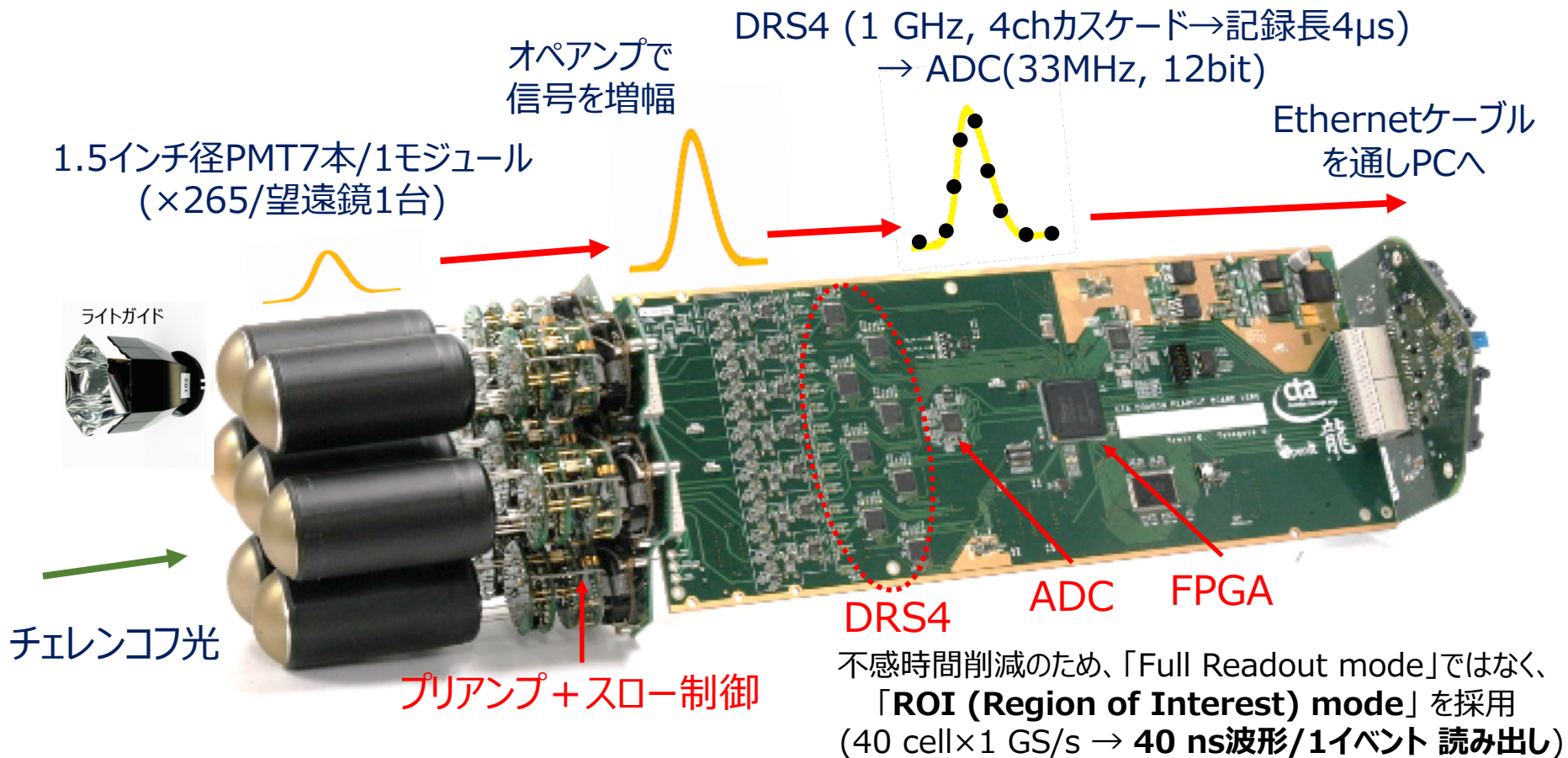
* Open-Itとの共同開発

☑ GHzサンプリング可能であること:

～3 ns幅のチェレンコフ光、～100 MHzで混ざる夜光背景事象を除去可能であるため

☑ 低消費電力であること:コスト削減やカメラの安定動作のため (< 3 W/チャンネル)

→ **読み出し回路にDRS4を採用**

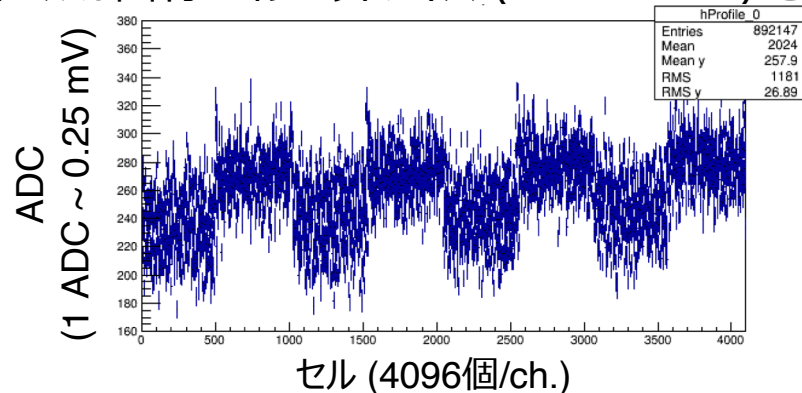


DRS4取得データに必要な処理

[2019年春季大会等で
共同研究者より報告]

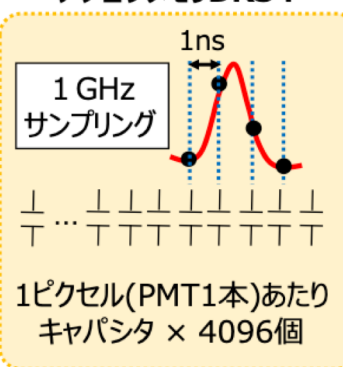
オフセット差引き

各セルは固有のオフセットノイズ (50–75 mV) を持つ

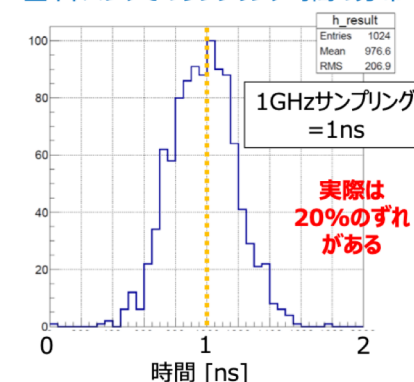


時間補正

アナログメモリDRS4



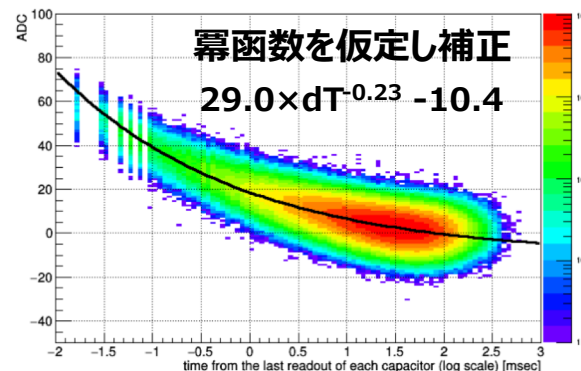
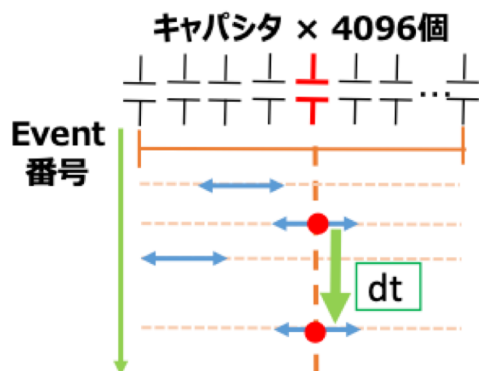
全キャパシタでのサンプリング時間の分布



Sine波回路などを用いて補正

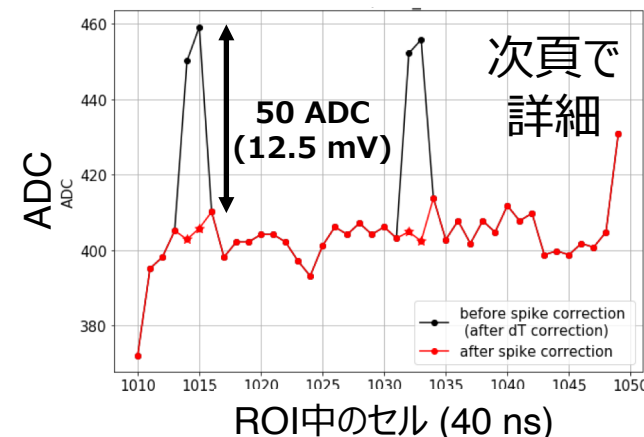
dT補正

dT (≡ 各セルでの読み出し時間間隔)
が短いほど、ノイズレベルが増加



512対称スパイク補正

条件を満たすと偽パルスが見える

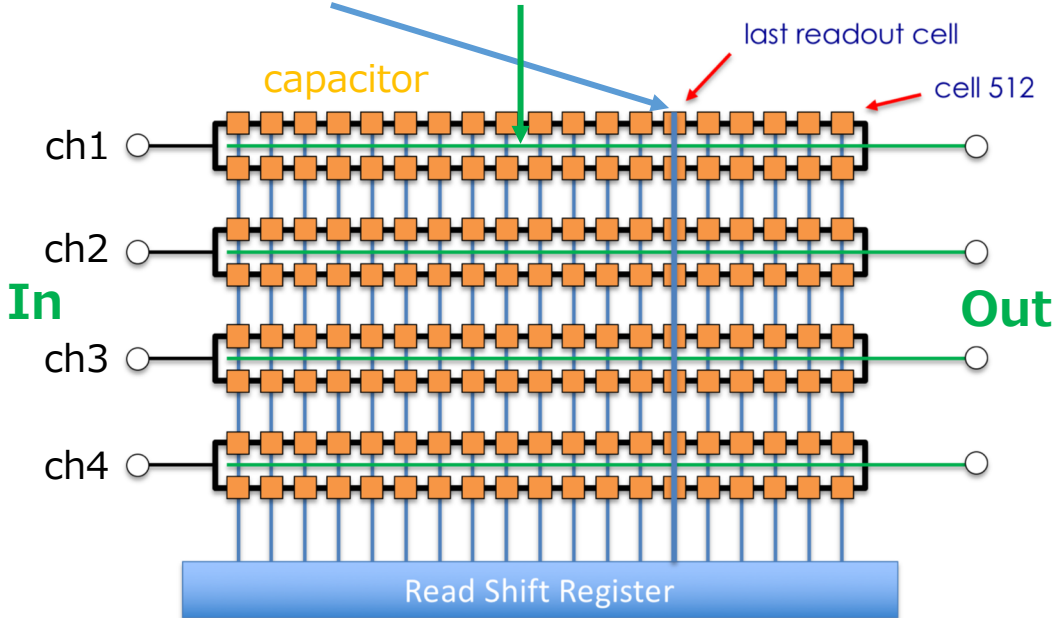


全4工程はCTA標準解析ツール (<https://github.com/cta-observatory/ctapipe>) に組込済み

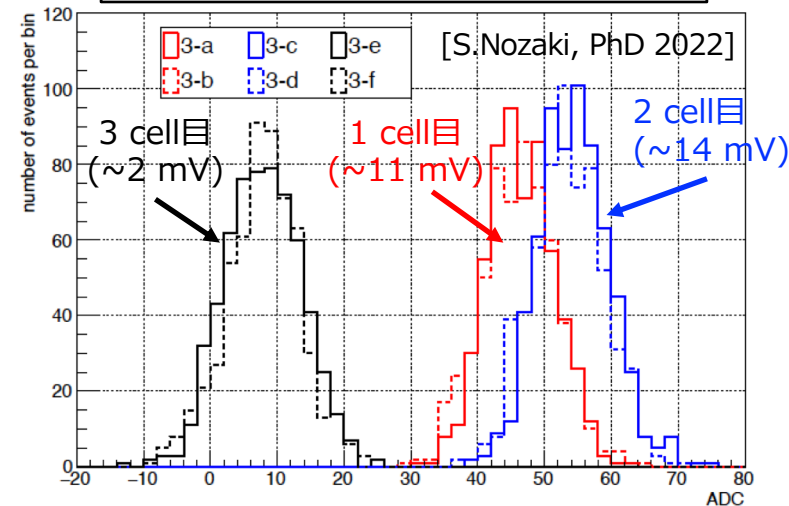
512対称スパイクとその解釈

DRS4のフォーラムに記載: <https://elog.psi.ch/elog/DRS4+Forum/697>

- ☑ DRS4の読み出し線の構造に由来
- ☑ 制御信号線が、読み出し線上にある浮遊容量に電荷を与えることで発生



512対称スパイクの電圧分布



- ☑ 発生パターンはよく理解されている [Nozaki+2020, TAUP2019] → 解析上で除去可能
 - A: 前のイベントのROI最後のcellを読み出した時
 - B: 前のイベントのROI最後のcellと512番目のcellに対して対称なcellを読み出した時
 - ABそれぞれ3cell連続で起こる (1cell目: ~11 mV, 2cell: ~14 mV, 3cell: ~2 mV)
- ☑ 発生確率は合計0.05%程度

読み出し回路の雑音分布

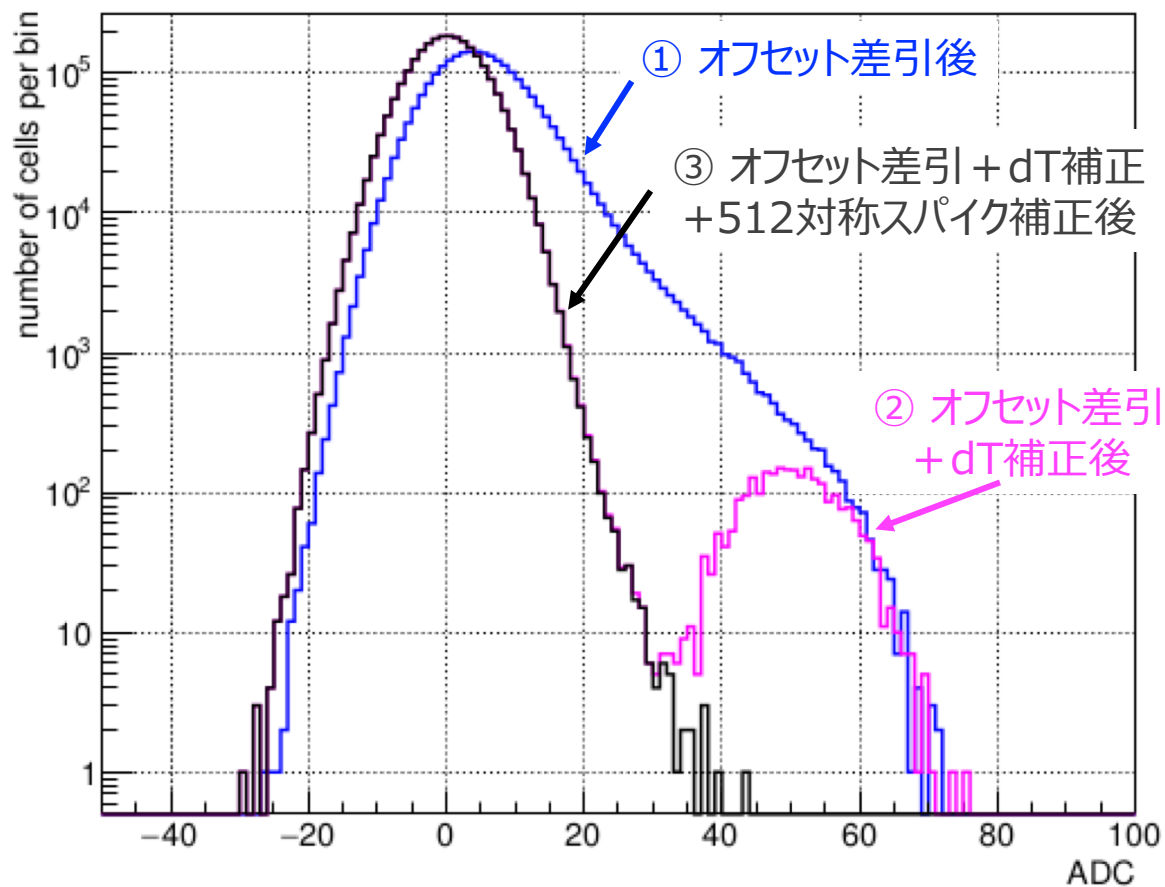
オフセット差引き

dT補正

512対称スパイク補正

を施すと..

LST初号機の電磁雑音分布



読み出し回路の雑音分布

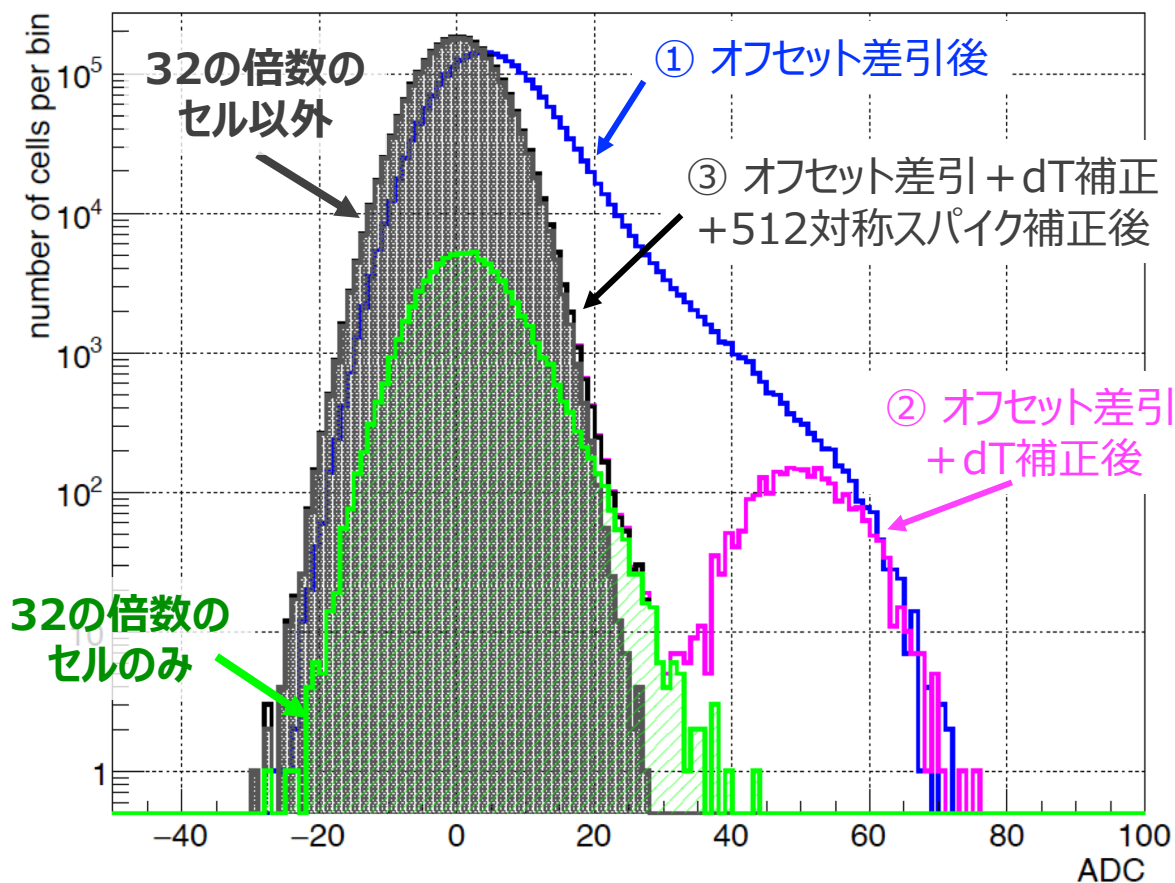
オフセット差引き

dT補正

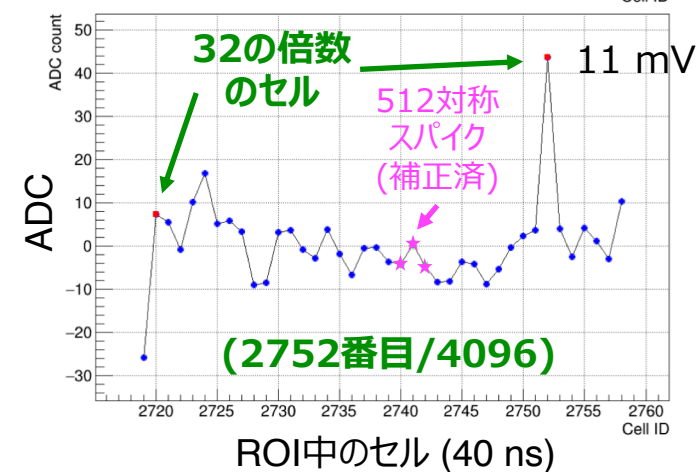
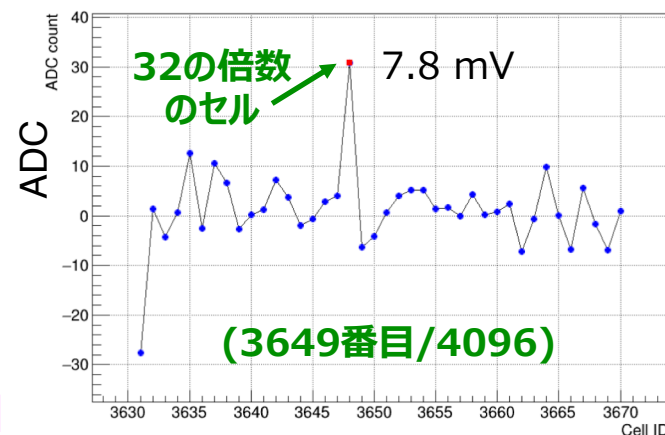
512対称スパイク補正

を施すと..

LST初号機の電磁雑音分布



波形を見ると...



☑ 32の倍数のセルはノイズが大きい → 波形から新たなスパイク事象を発見

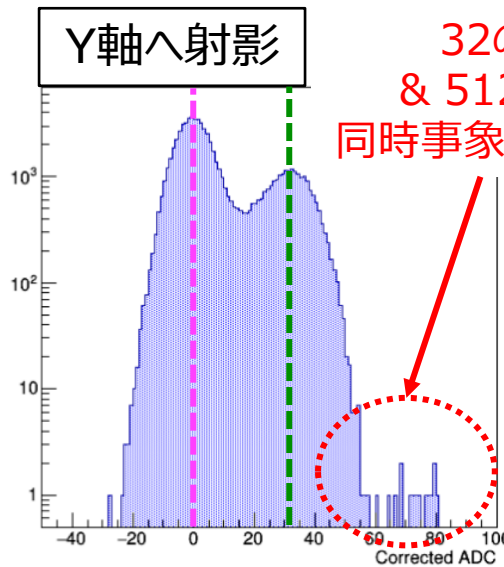
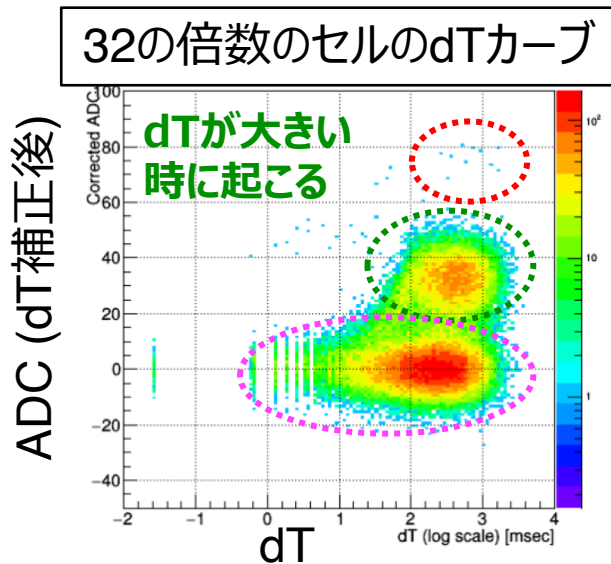
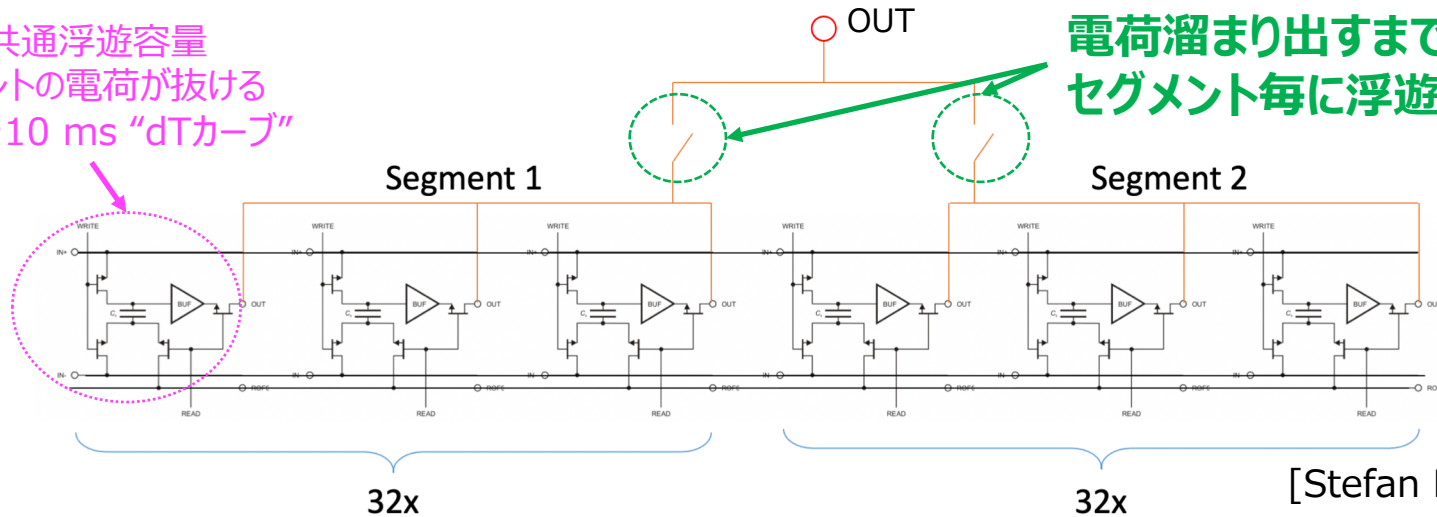
“32の倍数”に関わる構造

32セルのセグメント毎にスイッチがあり、読まれるタイミングで繋がれる

→ 32個のセルの内、最初 or 最後のセルを読み出す時に**スパイク**が乗る？

全セル共通浮遊容量
前イベントの電荷が抜ける
までに~10 ms “dTカーブ”

電荷溜まり出すまでに~10 ms
セグメント毎に浮遊容量がある



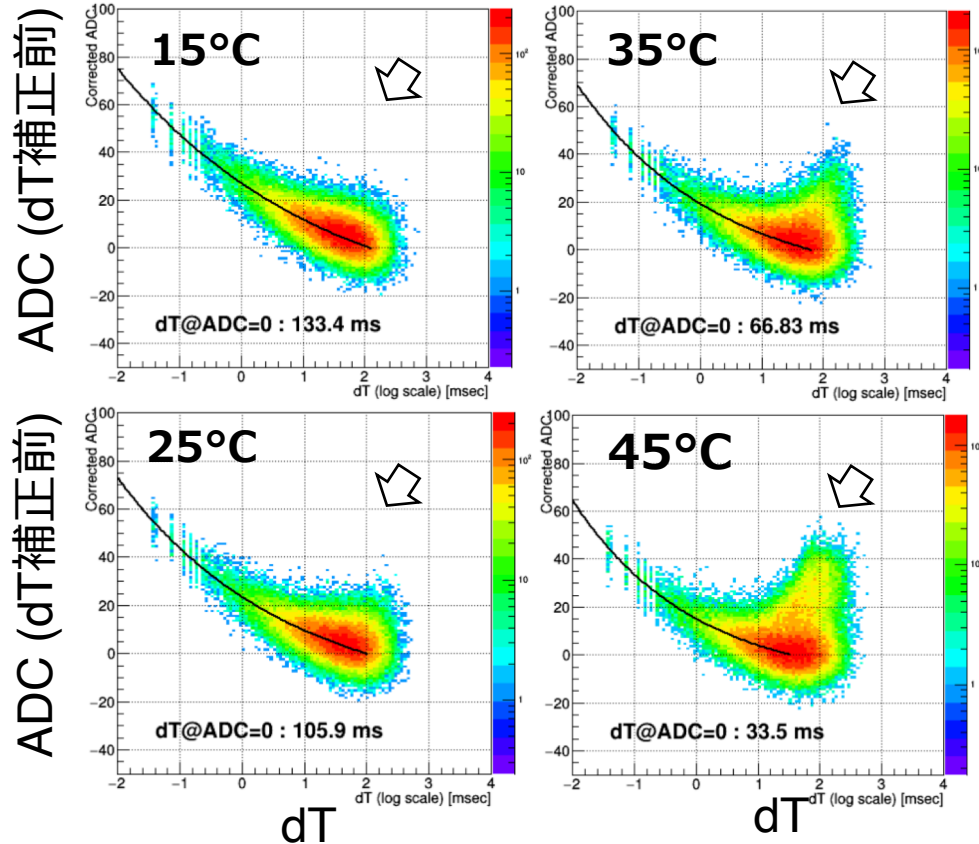
(32の倍数セルスパイク) ~ 30%
(512対称スパイク) ~ 0.05%
(同時に起こる確率) ~ 0.015%

2つが独立事象ならば、
7万中10イベント程度が期待
→ コンシステント

32の倍数セルスパイク: 温度依存性

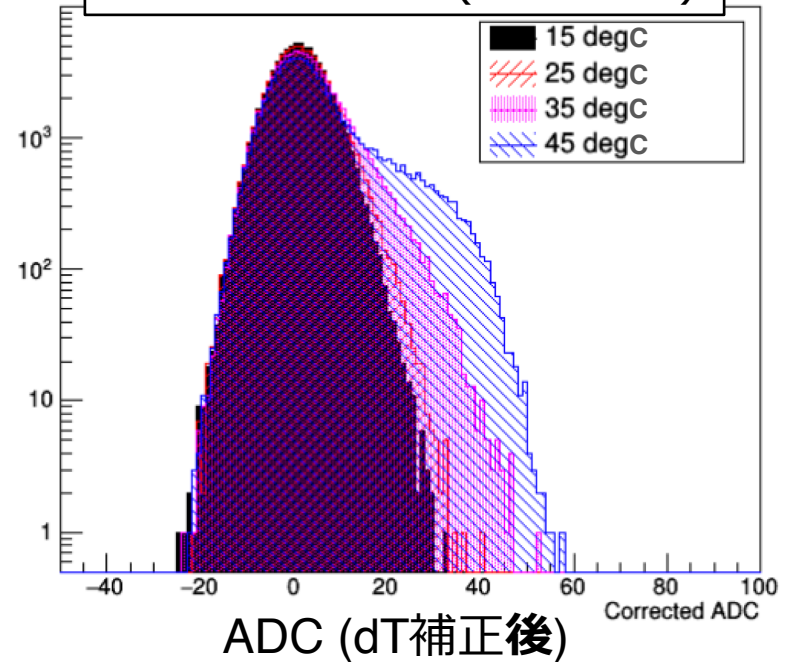
先行研究 [野崎氏修博論, 2018/2022] では、dTカーブの温度依存性が指摘
ROIモード 40 cell、2 kHzのランダムトリガーを用いて雑音データを恒温槽にて取得

32の倍数セルのdTカーブ



☑ 温度上昇 (15→45°C) に伴い、
dTカーブがより急峻に変化

ADC分布の変化 (dT補正後)

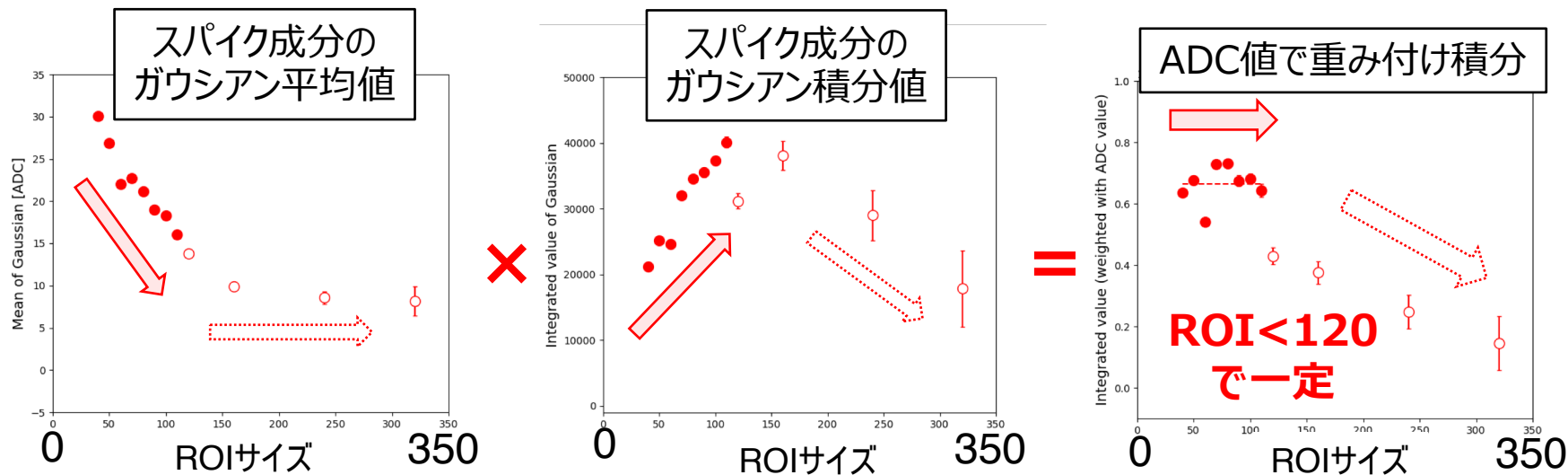
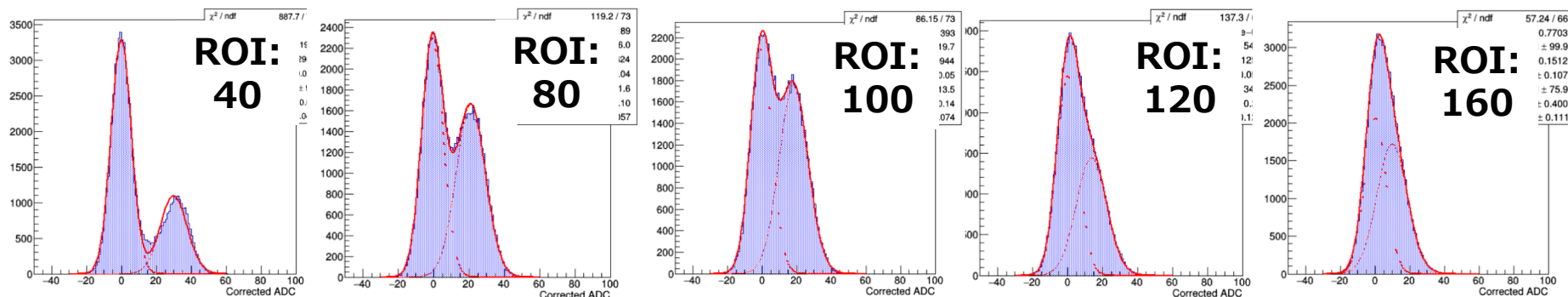


☑ 温度上昇により、32の倍数セルスパイクの発生確率は増加
「dTカーブ」と「32の倍数セルスパイク」は何かしら関連性を持っている？

32の倍数セルスパイク: ROI依存性

- ☑ スパイク波高値・レートが **ROIサイズ (一度に読み出しセル数)** に依存することを発見
 → ROI>120以上でスパイクとノイズの山は分離できなくなるほど、波高値は小さくなる

dT = 10–1000 ms での32の倍数セルのADC分布 (dT補正後、室温~30度で測定)



- ☑ スパイクの波高値×レート (= 32の倍数セルスパイクの供給元からの電荷量) が保存？

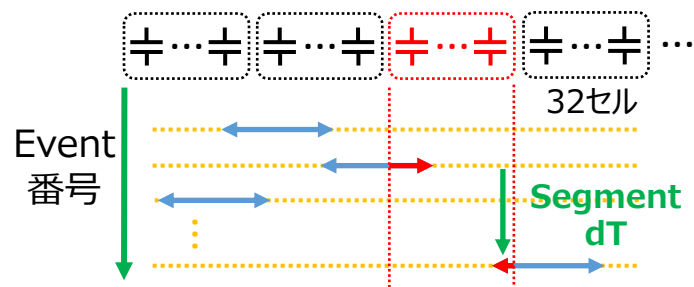
32の倍数セルスパイク: セグメントdT

dTが同じにも関わらずROIサイズに依存してスパイク発生確率変動
→ セグメント (32セル) 毎の"dT"に依存するのでは？

Segment dT

≡ 各セグメントでの読み出し時間間隔

セグメント×128個 (キャパシタ×4096個)



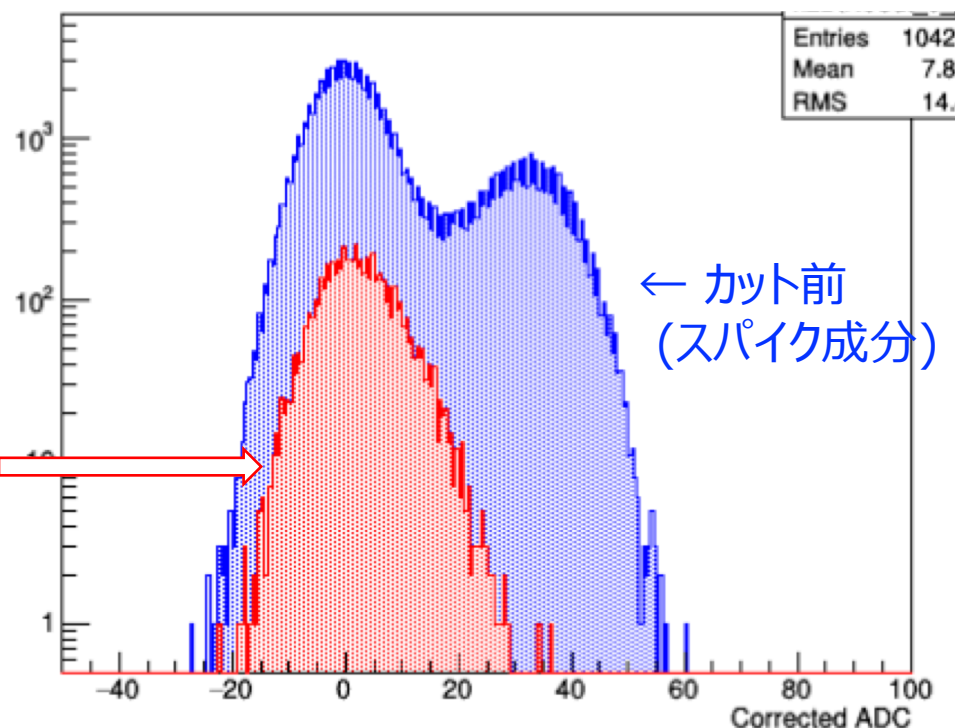
セグメントdT < 20 ms の事象を選択



スパイク事象の除去に成功

本来30%程度の割合でスパイクが起こるところ
1000事象に対し、そのような事象は見られない

32の倍数セルのADC分布
(dT補正後、室温・ROI=40で測定、dT>20 ms)



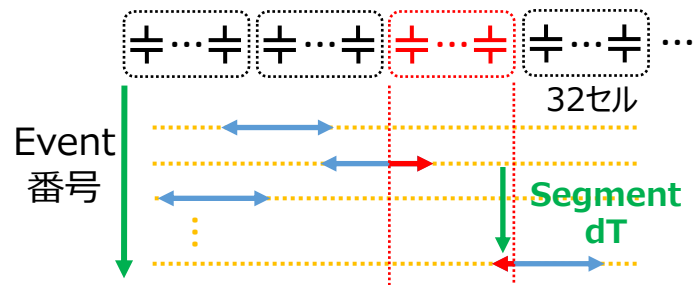
32の倍数セルスパイク: セグメントdT

dTが同じにも関わらずROIサイズに依存してスパイク発生確率変動
→ セグメント (32セル) 毎の"dT"に依存するのでは？

Segment dT

≡ 各セグメントでの読み出し時間間隔

セグメント×128個 (キャパシタ×4096個)



セグメントdT < 20 ms の事象を選択

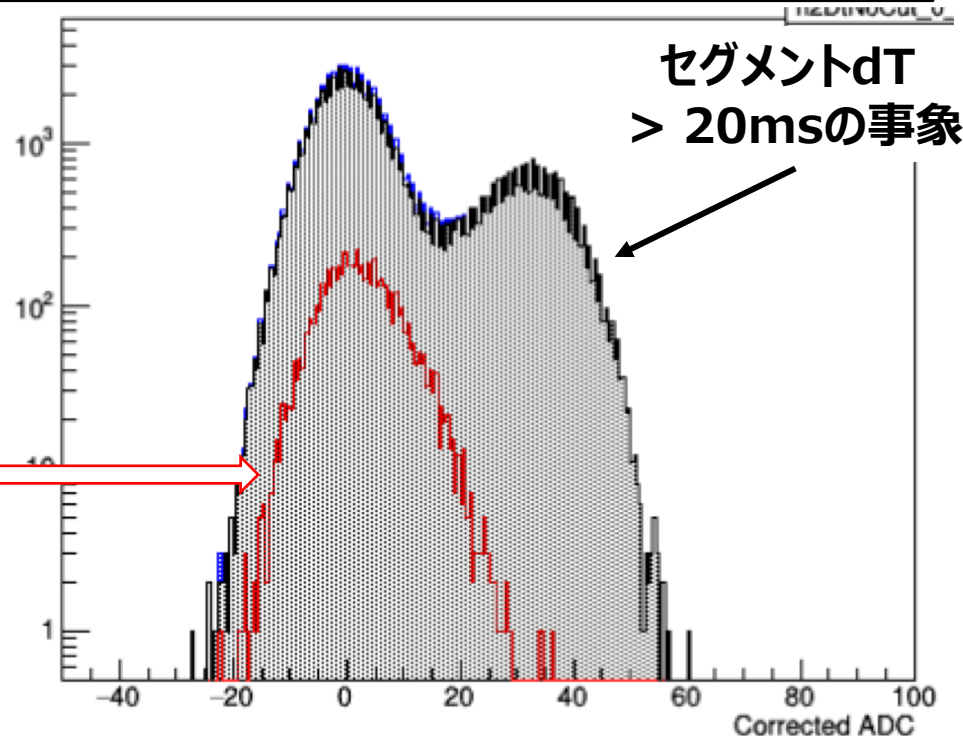


スパイク事象の除去に成功

本来30%程度の割合でスパイクが起こるところ
1000事象に対し、そのような事象は見られない

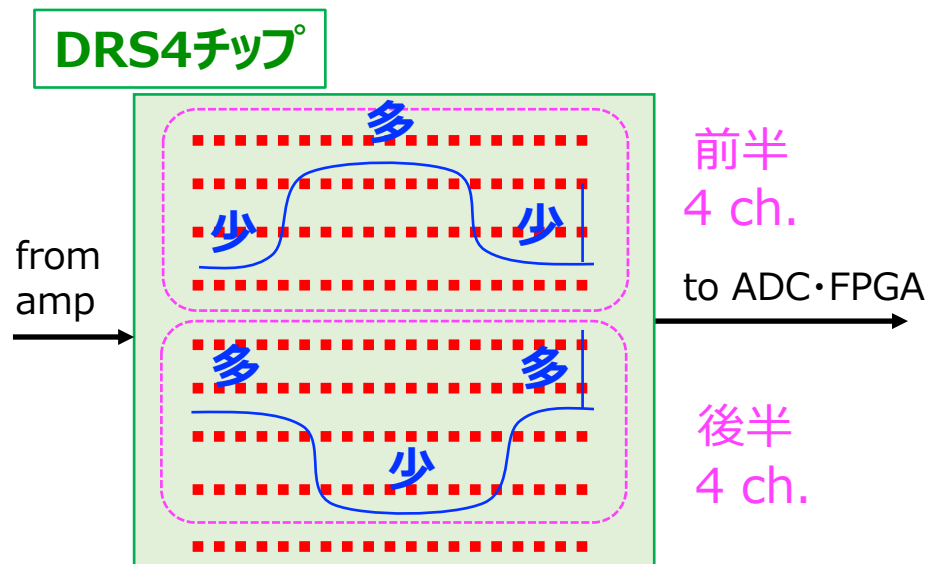
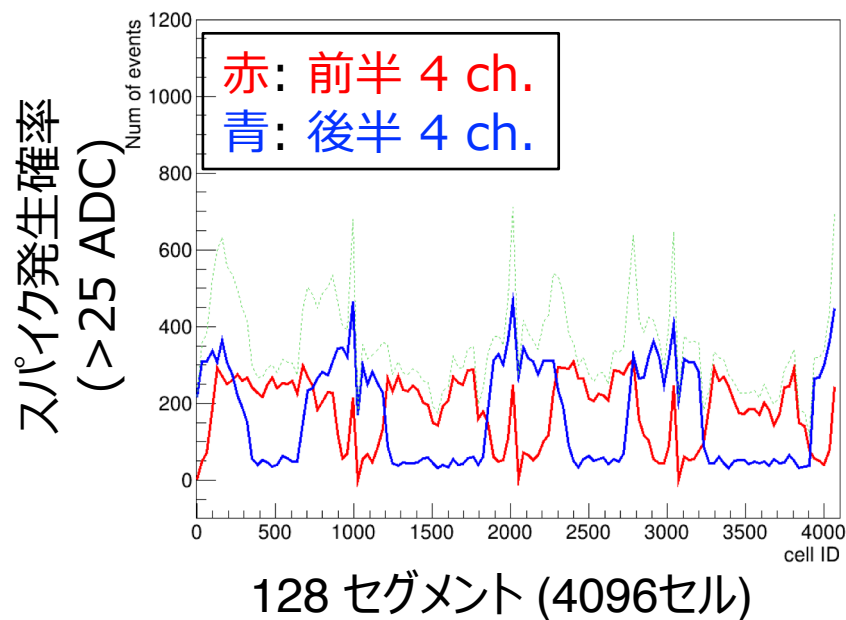
→ しかしスパイクでない事象をほとんど落としてしまっている。
セグメントdTによる事象選別は不完全

32の倍数セルのADC分布
(dT補正後、室温・ROI=40で測定、dT>20 ms)



32の倍数セルスパイク: セグメント依存性

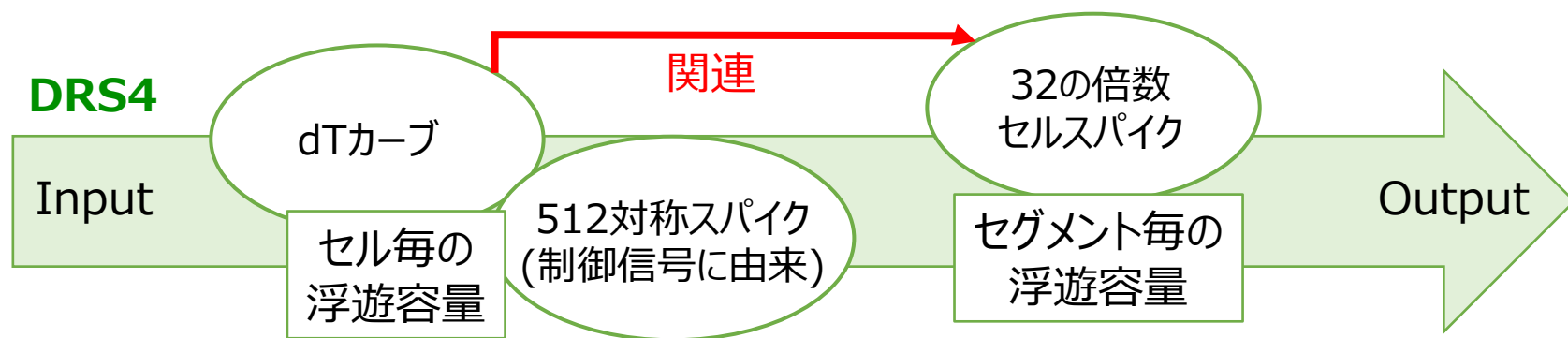
スパイク(>25 ADCの事象) 発生確率のセグメント間の違いを調査。



- ☑ スパイクが起こりやすいセグメントと、起こりにくいセグメントがあることが判明
- ☑ 4chカスケード読み出しを採用しているが、1チップ内 (前半4ch・後半4ch) で反相関のような対応関係に見える
 - 複数のセグメントは複雑に接しあっており、スパイク発生条件が難解になっている？
- ☑ ソフトウェア解析でのスパイク除去は現段階では難しい (更なる調査が必要)

望遠鏡観測運用への影響 & まとめ

- ☑ アナログメモリDRS4は低消費電力GHzサンプリングを可能にするため多くの実験で利用
チップ内の浮遊容量に起因する偽スパイク事象が発生しうる
- ☑ 既知であった512対称スパイクに加え、32の倍数セルスパイクの解釈を深めた
 - ・ セグメント(32 cell)毎に存在する浮遊容量に起因。
 - ・ dTカーブとの関連性を発見。dTカーブを知ることで発生確率を推定可能



- ☑ 観測運用への影響
 - ・ dT補正、512対称スパイクは除去可能。
 - ・ **32の倍数セルスパイクは解析による補正は難しいが、望遠鏡運用におけるトリガーレート5-10 kHzでのdTは短いので発生確率は無視できる。(カメラ内温度も冷却システムにより制御できている)**

