

修士学位論文

次世代ガンマ線天文台CTAにおける
波形記録回路TARGETの時間応答特性の評価

2016年度
(平成28年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

15NM161L

重中茜

概要

次世代ガンマ線天文台 CTA 計画は、口径ごとに観測エネルギー帯の異なる大中小のチェレンコフ望遠鏡を広範囲に並べ、20 GeV から 100 TeV 以上のエネルギー帯でガンマ線を観測することを目的とした観測計画である。中でも小口径望遠鏡は、1 TeV から 100 TeV 以上の最高エネルギー帯のガンマ線の観測を狙っている。ガンマ線は高エネルギーほど到来頻度が少なくなるが、CTA では小口径望遠鏡を広範囲に多数設置し、有効面積を広げることでガンマ線の検出数を稼ぎ、感度を向上させる。小口径望遠鏡は数十台以上必要になるため、製作費用の低減は重要である。小口径望遠鏡で提案している主鏡と副鏡を用いたデュアルミラー光学系では、副鏡により焦点面のイメージを圧縮することができる。この光学系は、多チャンネル光検出器と安価な読み出し回路を用いることで、焦点面カメラの小型化が可能である。これにより望遠鏡を支える構造体の削減および、製作費用の抑制が可能である。

チェレンコフ望遠鏡は、ガンマ線が大気と相互作用した際に生じるチェレンコフ光を焦点面カメラで観測し、そのイメージ形状、光量を解析することで、ガンマ線の到来方向およびエネルギーを推定する。TARGET は、デュアルミラー光学系用のカメラが検出した信号波形を記録する集積回路である。TARGET には記録セルと呼ばれる並列キャパシタアレイがあり、各セルを 1 GHz の周波数で切り替えることで、数ナノ秒程度の幅であるガンマ線由来の光信号の時間情報を、1 ナノ毎に記録することができる。しかし、各セルの切り替えにはセル毎に応答時間のばらつきが存在する。そのため、観測信号の時間情報が歪んでしまう。このことは、望遠鏡の角度分解能に影響があるだけでなく、チェレンコフ光量の時間積分値によって求めるガンマ線のエネルギー分解能を悪化させる。したがってこれらの改善のためには、応答時間のばらつきの補正が不可欠である。

本研究ではまず、CTA 大口径望遠鏡の波形記録集積回路における先行研究を参考に、TARGET の応答時間ばらつきの測定アルゴリズムを確立した。この方法は、ファンクションジェネレータから TARGET に周期的な既知の波形を入力し、出力波の周期を 1 周期毎に入力波の周期と比較することで、TARGET の応答時間を評価する。また、既知の応答時間ばらつきを持たせた疑似的な周期的な波のデータを作り、応答時間ばらつきの測定シミュレーションを行うことで、その測定精度を推定した。その結果、今回の方法では、 ~ 0.1 ns の精度でばらつき測定が可能であることを検証した。この測定方法を実際に第 2 世代、第 3 世代、および 2015 年 12 月時点で最新の TARGET の測定に適用した結果、各セルの切り替え時間に対する応答時間ばらつきは 1ns 以下であり、理想時刻に対しデータとびがないと言える大きさであることが分かった。さらに、TARGET にパルス波を入力し、応答時間ばらつきの補正前後でパルス波の電荷量積分値のばらつきを比較した。その結果、補正により電荷分解能が 0.59 ポイント改善するという結果が得られた。さらに、測定データに混入するノイズの補正を加えたところ、電荷分解能は最終的に 1.08 ポイント改善した。

次に本研究では、光検出器を接続した TARGET カメラモジュールを用い、周期的なパルス光の照射による応答時間ばらつきを測定した。この方法をとる動機として、デュアルミラー小口径望遠鏡のカメラには、TARGET が約 2000 チャンネル分搭載されることを挙げる。実際に望遠鏡を動かす段階で、上記のようにファンクションジェネレータを TARGET の各チャンネルに接続することは難しい。そこで本研究では、ファンクションジェネレータの代わりに LED を周期的に光らせ、TARGET カメラモジュールに接続した MPPC で LED 光を観測することで、応答時間ばらつきの一括測定を狙った実験を行った。具体的には、その準備段階として 1 チャンネル MPPC を用い、周期的な LED 光に対する応答時間ばらつきの測定が可能であるかを検証した。

その結果、応答時間ばらつきはリファレンスに対し 0.1ns の精度で測定できるという結果が得られた。今後は測定系の改善、複数チャンネルの光検出器を用いた一括測定を実際に行う等により、一括補正の精度の向上を目指す。

目次

1	高エネルギーガンマ線天文学	7
1.1	ガンマ線観測の意義	7
1.2	ガンマ線放射機構	7
1.2.1	π^0 中間子の崩壊	7
1.2.2	電子制動放射	8
1.2.3	電子の逆コンプトン散乱	9
2	Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画	11
2.1	計画概要	11
2.2	電磁シャワー	11
2.3	地上チェレンコフ望遠鏡	13
2.4	小口径望遠鏡	15
2.5	焦点面カメラ	17
2.6	カメラの光検出器	17
2.6.1	アバランシェ・フォトダイオード	18
2.6.2	SiPM	19
2.7	TARGET	19
2.7.1	TARGET の時間応答特性	22
3	TARGET の応答時間ばらつきの補正	26
3.1	応答時間ばらつきの測定意義	26
3.2	応答時間ばらつきの測定	29
3.2.1	測定環境	30
3.2.2	DAC 値の電圧値変換	31
3.2.3	ADC 値の電圧値変換	33
3.2.4	応答時間ばらつきの測定原理	33
3.3	応答時間ばらつきの理論的な測定限界	39
3.4	TARGET5 の応答時間ばらつき測定結果	41
3.5	シミュレーションによる最適イベント数と damping factor の選定	42
3.5.1	damping factor を固定した場合の、イベント数に対する応答時間ばらつき測定精度	43
3.5.2	イベント数を固定した場合の、damping factor に対する応答時間ばらつき測定精度	46
3.6	TARGET の応答時間ばらつき測定結果	47
3.7	TARGET の測定結果を踏まえたシミュレーションによる応答時間ばらつきの測定精度	48
3.7.1	理想的なサンプリング速度からのずれの大きさに対する測定精度	48
3.7.2	応答時間ばらつきの大きさに対する測定精度	51
3.8	電荷分解能の評価	52
3.8.1	応答時間ばらつきの補正による電荷分解能の評価	52
3.8.2	スパイクノイズの除去による電荷分解能の評価	53

4	発光ダイオード (LED) 光を用いた応答時間ばらつき測定	58
4.1	LED 光を用いた測定の意義	58
4.2	ファンクションジェネレータを用いた応答時間ばらつきの測定結果	59
4.3	LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定環境	60
4.3.1	LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定結果	61
4.4	シミュレーションによる LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定精度	67
5	まとめ	69
A	TARGET の制御、データ取得ソフトウェアのインストール方法	70
B	TARGET 波形取得スクリプト	70
C	応答時間ばらつきの測定アルゴリズム	77

目次

1	宇宙線陽子と星間物質による相互作用 [4]	7
2	π^0 中間子崩壊によるガンマ線スペクトル (Stecker, 1971)[8]、 π^0 中間子生成の反応 断面積 [5]	8
3	制動放射 [4]	9
4	逆コンプトン散乱 [4]	9
5	CTA の完成予想図 [1]	11
6	ガンマ線による空気シャワー現象 [11]	12
7	地上チェレンコフ望遠鏡によるシャワーのステレオ観測 [10]	13
8	望遠鏡カメラにおけるチェレンコフ光イメージ [10] 左図は各望遠鏡が観測したイ メージ図、右図は各望遠鏡でのイメージを重ね合わせたもの	13
9	宇宙線によるハドロンシャワーの生成 [11]	14
10	ガンマ線によるイメージ (左) 宇宙線によるイメージ (右) [10]	15
11	Davies-Cotton 光学系 (SST-1M)[12]	15
12	Schwarzschild-Couder 光学系 (左:ASTRI[12] 右:GCT (写真:奥村暁 (名大 ISEE)))	16
13	CHEC (左、写真:奥村暁 (名大 ISEE)) とカメラモジュール (右、Albert et al. (2016) in prep.)	17
14	APD の光電流増倍原理 [17]	18
15	SiPM の構成図 [17]	19
16	TARGET の内部構造 [20]	20
17	sampling array の構造 [21]	20
18	本測定で使用した各 TARGET の写真	22
19	サンプリングセル周りの回路及び CMOS インバータの構造	22
20	CMOS インバータの応答	23
21	TARGET の CMOS インバータの構造 [25]	24
22	応答時間ばらつきのあるセルによるサイン波サンプリングの例	25
23	チェレンコフ光イメージ長軸の交点決定精度は、 θ が小さくなるほど悪くなる。[27]	26
24	イメージ長軸交差法と、T.G+確率密度分布を用いた解析の、イメージ観測望遠鏡 数に対するガンマ線ソース位置の再構成精度の比較 [28]	27
25	モンテカルロデータを使って求めたガンマ線源位置の確率密度分布 [28]	27
26	応答時間ばらつきによる波形の変形	28
27	シミュレーションによる小口径望遠鏡の電荷分解能。赤: 取得データの補正なし、 黒: 光量が飽和している波高データをフィッティングにより補正した場合、青: 要 求値、緑: 目標値 [30]	29
28	wilkinson ADC の動作原理 [31]	30
29	TARGET 周辺接続環境	31
30	各 TARGET の $V_{ped}(DAC)$ と電圧値の関係	32
31	各 TARGET の ADC 値と電圧値の関係	33
32	応答時間ばらつきの測定原理の概略図 (分かりやすくするため、伸ばし幅を大きく 表記)	34
33	damping factor の大きさに対する、イベント積み重ねによる応答時間ばらつきの変 化の様子	35
34	サイン波の周期分割の図	36

35	サイン波の振動中心の変更による 0 交点直前のセルの再定義	36
36	波形データの 0 交点の定義	37
37	(a) 理想的な波形立ち上がり時の 0 交点 (b) 電圧ノイズを考えた場合の 0 交点 [26]	40
38	(c) サンプリング周波数が大きい場合の立ち上がりのデータ点 [26]	40
39	TARGE5 初期の応答時間ばらつき測定結果 (左) 100 番目のセルのイベント積み重ねに対する収束の様子 (右)	42
40	のこぎり波形の疑似時刻ずれ	43
41	イベント数に対する応答時間ばらつき測定の結果	44
42	イベント数に対する応答時間ばらつきの測定精度	45
43	100 万イベント測定時の 100 番目のセルにおける値の変化の様子	46
44	damping factor 毎の 100 万イベント測定時の 100 番目のセルにおける変化の様子	46
45	damping factor とイベント数組み合わせの違いによる応答時間ばらつきの測定精度	47
46	各 TARGET のサンプリング時刻ずれ測定結果	48
47	1.0GHz サンプリングにおける疑似時刻ずれ	49
48	サンプリング速度ずれがある場合の応答時間ばらつき測定結果	50
49	サンプリング速度ずれがある場合の応答時間ばらつき測定精度	50
50	理想サンプリング時間幅に対するずれの大きさと応答時間ばらつき測定結果	51
51	理想サンプリング時間幅に対するずれの大きさによる応答時間ばらつき測定精度	52
52	測定電荷量の定義	52
53	電荷分解能の測定結果 (左:応答時間ばらつき補正前 右:補正後)	53
54	TARGET7 におけるスパイクノイズ混入の例	54
55	TARGET7 におけるスパイクノイズの検出セル	54
56	TARGET7 における同時にスパイクノイズを検出したチャンネルの数	55
57	TARGET7 のチャンネル 1 に対するチャンネル 6 のスパイクノイズの波高の比	55
58	スパイクノイズの除去方法	56
59	電荷分解能の測定結果 (左:スパイクノイズ補正前 右:補正後)	56
60	スパイクノイズ除去、応答時間ばらつき補正後	57
61	LED 光を用いたばらつき測定環境	58
62	TARGET7 モジュールからの出力サイン波の例	59
63	TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定結果	60
64	測定環境	60
65	LED および周りの回路図 (左) SiPM 周りの回路図 (右)	61
66	LED をパルス波で光らせたときの TARGET7 モジュールからの PC への出力結果 (左: 光学フィルターなし、右: 3.2%光学フィルターあり)	61
67	LED をサイン波で光らせたときの TARGET7 モジュールからの PC への出力結果	62
68	スパイクノイズの混入とデータ飛びの例	63
69	データが飛びのあるイベントを含む TARGET7 の応答時間ばらつき測定結果 (左) データ飛びのあるイベントの処理を飛ばした場合の測定結果 (右)	63
70	減光フィルターなし、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果	64
71	減光フィルターなし、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性	64
72	3.2%減光フィルターあり、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果	65

73	3.2%減光フィルターあり、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性	65
74	50MHz サイン波による発光時の応答時間ばらつき測定結果	66
75	50MHz サイン波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性	66
76	シミュレーションに使用した 10MHz パルス波	67
77	10MHz パルス波を用いたシミュレーションの結果	68
78	シミュレーションによる応答時間ばらつき測定精度	68

表 目 次

1	GCT への光学系仕様 [1]	16
2	CHEC の主な仕様 [1]	18
3	各 TARGET の仕様 [20]	21
4	TARGET 周辺接続環境	31

1 高エネルギーガンマ線天文学

1.1 ガンマ線観測の意義

宇宙には、高エネルギーの粒子や電磁波を放出する様々な現象が存在しており、地球にはこれらの粒子や電磁波が常に到来している。中でも宇宙から地球に到来する高エネルギーな原子核（宇宙線）は、銀河系内で $1\text{eV}/\text{cc}$ と高いエネルギー密度を持ち、我々の銀河の基本構成要素の一つである。しかし、宇宙線の加速源や加速機構については、宇宙線が発見されて以来 100 年以上経った今でも、謎のままである。宇宙線の問題の他にも、太陽が一生の間に発する全エネルギーに匹敵する 10^{53} erg のエネルギーを数秒から数十秒の間に放出する、ガンマ線バーストの詳細な構造や、ダークマターの正体など、宇宙現象には解明されていない問題が多々存在する。

これら未解決問題を大きく推し進めると期待されているのが、宇宙からの高エネルギーガンマ線観測である。高エネルギーガンマ線は、主に非常に高いエネルギーまで加速された荷電粒子に伴って放射される。またガンマ線は宇宙線のように宇宙空間の磁場による影響を受けることなく、ソース天体からまっすぐ地球に到来する。このように宇宙の高エネルギー現象と直接関係するガンマ線の観測は、上記の課題を解明するための強力な手段である。

現在までの高エネルギーガンマ線の観測は、H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS に代表される地上チェレンコフ望遠鏡により、多くの成果があげられている。しかし今後の更なる研究のためには、現在よりも精密かつ多くの観測データが必要となる。そこで、次世代のガンマ線天文学の研究施設として、Cherenkov Telescope Array(CTA) が提案された [?][2]

1.2 ガンマ線放射機構

宇宙から到来する高エネルギーガンマ線は、宇宙空間の高エネルギーな荷電粒子が星間物質と相互作用することによって放射される [3]。特に宇宙線を構成する大部分は陽子であり、次いで電子である。本論文で取り上げる次世代ガンマ線天文台 CTA では、GeV から TeV 領域の高エネルギーガンマ線の観測による、宇宙線の起源をはじめとした様々な宇宙現象の解明を目的としている。そこで以下では、宇宙線の相互作用による主要な高エネルギーガンマ線の放射機構について述べる。

1.2.1 π^0 中間子の崩壊

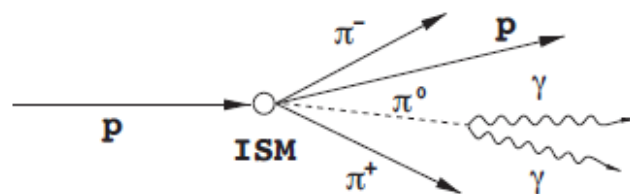


図 1: 宇宙線陽子と星間物質による相互作用 [4]

図1は宇宙線陽子と星間物質による相互作用の図である。高エネルギーな陽子と原子核の相互作用では、中性子や π^+ 、 π^- 、 π^0 中間子などが生じる。特に π^0 中間子は発生後約 10^{-16} 秒で崩壊し、2個のガンマ線を生じる。[4][3]

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (1)$$

π^0 中間子の崩壊によるガンマ線のエネルギー E_γ は、 π^0 中間子が静止状態の時に67.5MeVのエネルギーを持ち、ガンマ線は互いに反対方向に放出される。この時 π^0 中間子の質量を m_{π^0} として以下のように表される。[4]

$$E_\gamma = \frac{1}{2}m_{\pi^0}c^2 \quad (2)$$

また実験系において、 π^0 中間子が相対論的な速度 $v = \beta c$ で運動している場合は、放出されるガンマ線のエネルギーが以下のように表される。[4]

$$E_\gamma = \frac{1}{2}m_{\pi^0}c^2 \frac{1 + \beta \cos \theta_\gamma}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3)$$

なお θ_γ は放出されたガンマ線の間角度を示す。 π^0 中間子の崩壊は π^0 中間子の静止系において等方的に起こるため、この時のガンマ線のエネルギー分布は、図2左に示すように、 $\cos \theta = \pm 1$ で決まる範囲で平らなスペクトルを示す。またエネルギースペクトルは67.5MeVのところでも対称になる。また、 π^0 中間子を生成する相互作用の反応断面積は陽子と原子核のエネルギーの和に依存しており、実験的に図2右のようになることが分かっている。[5]

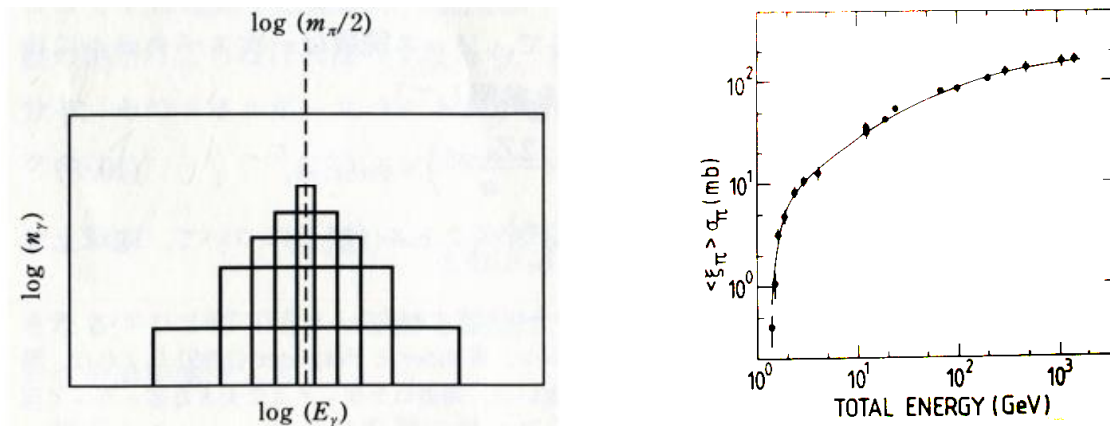


図2: π^0 中間子崩壊によるガンマ線スペクトル (Stecker, 1971)[8]、 π^0 中間子生成の反応断面積 [5]

1.2.2 電子制動放射

図3は、運動する電子と原子核との相互作用の図である。運動している電子が周囲の物質中の原子核に近づくと、原子核の作る電場により加速度運動を行い、ガンマ線が放出される。この現象を制動放射と呼ぶ。制動放射によるガンマ線のスペクトルは、元となる電子のエネルギースペクトルに依存した形状を示す [4]。相対的な運動をする電子について、電子の制動放射のエネルギー E の損失は以下のように表される。[3]

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{Brems} = \frac{3}{2\pi}\sigma_T c \alpha Z(Z+1)N[\ln \gamma + 0.36]E \quad (4)$$

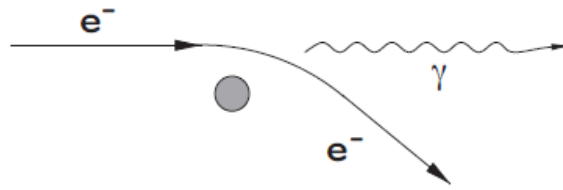


図 3: 制動放射 [4]

ここで σ_T はトムソン散乱断面積 ($0.665 \times 10^{-28} m^2$)、 α は微細構造定数 ($1/137.036$) である。また、 Z はターゲット物質の原子番号、 N は原子核の数密度 (個/ m^2)、 γ はローレンツ因子 ($\gamma = E/m_e c^2 \gg 1$) を表す。

制動放射のスペクトルは、 π^0 中間子の崩壊からのガンマ線スペクトルの山のある、67.5MeV よりも低いエネルギーまで、親となる電子のスペクトルに比例する。これは、制動放射によるガンマ線のエネルギーを決める尺度が、電子質量のみだからである。そのため、電子制動放射によるガンマ線のソース関数が、 π^0 中間子崩壊によるガンマ線のソース関数に比べて非常に小さくない限り、制動放射は π^0 中間子崩壊によるガンマ線スペクトルの山の低エネルギー側で主役となる [8]。

1.2.3 電子の逆コンプトン散乱

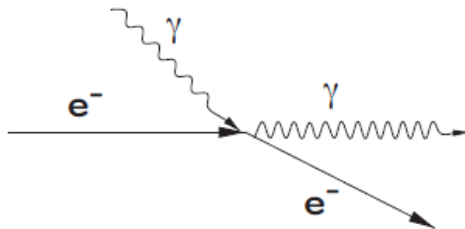


図 4: 逆コンプトン散乱 [4]

図 4 は、運動する電子と光子の相互作用の図である。エネルギー $h\nu$ の電波～可視光、またはガンマ線がローレンツ因子 γ の電子により散乱されると、電子のエネルギーの一部を受け取り、より高いエネルギーのガンマ線になる。これを逆コンプトン散乱という [3]。逆コンプトン散乱における電子のエネルギー損失は、以下のように表される。

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_{photon} \quad (5)$$

なお、 U_{photon} は背景の電磁波が持つエネルギー密度を表し、 σ_T はトムソン散乱断面積 ($0.665 \times 10^{-28} m^2$) である。逆コンプトン散乱による電子のエネルギースペクトル I_e は、以下のような式で表されるべき乗の形を示す。なお、 E_e は元となる電子のエネルギー、 K は正規化のための係数である。[6]

$$I_e(E_e) = K E_e^{-\Gamma} \quad (6)$$

ここで Γ は高エネルギー宇宙物理において、 $2 \leq \Gamma \leq 3.5$ したがう。すると、電子により散乱された光子は、元の電子のエネルギースペクトルの形を踏襲しつつ、元の電子のスペクトルよりもなだらかな形を示す。この時の光子のエネルギースペクトル I は、以下のように表される。[6]

$$-I(E_\gamma) = n_{ph} \sigma_T L_{eff} \int dE_e K E_e^{-\Gamma} \delta(E_\gamma - \frac{4}{3} \langle \epsilon \rangle \frac{E_e^2}{(mc^2)^2}) \quad (7)$$

ここで E_γ は光子のエネルギー、 n_{ph} は光子の密度、 L_{eff} は位階相互作用が起こるまでに電子が走る距離を表す。

2 Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画

2.1 計画概要

CTA 計画は、口径ごとに観測エネルギー帯の異なる大中小数十のチェレンコフ望遠鏡を南北サイトに設置することで、宇宙から到来するガンマ線を観測することを目的とした、次世代のガンマ線観測計画である [1]。CTA では、従来の望遠鏡に対し 20GeV から 100TeV 以上の広いエネルギー領域での観測、1桁以上高い感度の達成など、数々の目標を掲げて計画を進めている。特に広いエネルギー範囲で高精度な観測を行うに当たり、低エネルギー域 (<100GeV) は大口径望遠鏡、中間エネルギー域 (100GeV-10TeV) は中口径望遠鏡、高エネルギー域 (>10TeV) は小口径望遠鏡というように、各エネルギー域を最も感度よく観測できる望遠鏡がカバーしている。図5は、CTA の完成予想図である。CTA ではこれらの望遠鏡を、目標感度を期待できる配置のシミュレーションに基づき、約 10 平方キロメートルの範囲に設置して観測を行う。

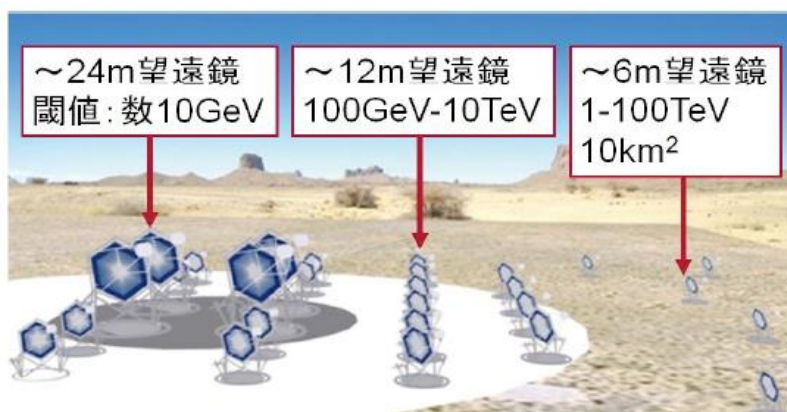


図 5: CTA の完成予想図 [1]

なお、望遠鏡アレイのデザイン等の基礎研究は 2010 年までにすでに完了しており、現在は望遠鏡の建設段階にある。今後は 2020 年の望遠鏡フル観測運転に向けて、建設を進めていく [1]

2.2 電磁シャワー

宇宙からの高エネルギーガンマ線は、大気に突入すると大気中の原子核と相互作用し、図6のように、電子・陽電子を対生成する。生成した電子・陽電子は制動放射を起こし、再びガンマ線を放出する。これを繰り返すことで粒子は増加していき、粒子のエネルギーが相互作用を起こさない値まで低下すると、粒子は減少していく。この減少を空気シャワー現象といい、特にガンマ線による空気シャワー現象を、電磁シャワーと呼ぶ [2]。電磁シャワーは大気中の物質の通過量が大きくなるとともに発達し、1TeV のガンマ線では高度約 10km において生成粒子数が最大となる。

高エネルギーのガンマ線により発生した電子・陽電子は、十分なエネルギーを持つ場合、大気中の光速より速く走るために、粒子の進行方向に偏った分極が生じる。これが元に戻るときに、チェレンコフ光が放出される。チェレンコフ光は $1/\lambda^2$ に比例するスペクトル分布を持つ光であるが、大気中で短波長側の吸収を受けるため、地上では 300nm 付近にピークを持つ、紫外～可視光領域の光として観測される。 [1]

チェレンコフ光の放出の条件は真空中の光速 c 、大気の屈折率 n 、粒子の速度を βc 、チェレンコフ光の放出角度を θ としたとき、 $\cos\theta = 1/\beta n$ で与えられる。この時チェレンコフ光のピーク波長 300nm、1 気圧の条件を考えると、地上付近では n の値は約 1.00029 となる。また、チェレンコフ光を放出するための β の条件は $\beta \geq 1/n$ である。これを考慮すると、大気中を走る粒子は進行方向に対し 2 度未満の広がりチェレンコフ光を放出する。 n の値は高度が大きくなるほど小さくなるため、シャワー発達が最大となる高度ではより狭い範囲にチェレンコフ光を放射する [10]。すると放出されたチェレンコフ光子は地上で、直径 300m 程度の範囲に一定の光子密度で分布する、light pool を形成する。 [1]

CTA におけるチェレンコフ望遠鏡は、このチェレンコフ光を観測することにより、ガンマ線のエネルギーおよび到来方向を推定する。 [1][11]

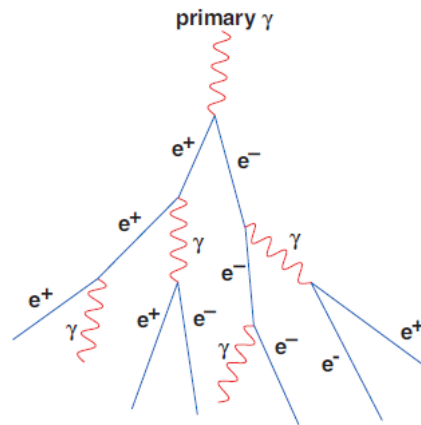


図 6: ガンマ線による空気シャワー現象 [11]

2.3 地上チェレンコフ望遠鏡

ここでは、CTA で用いる地上チェレンコフ望遠鏡の観測原理について述べる。前章で述べたように、宇宙から到来したガンマ線は、到来方向を軸とする電磁シャワーを発生させ、これに伴いチェレンコフ光が放出される。CTA では、複数台の地上チェレンコフ望遠鏡で電磁シャワーに伴うチェレンコフ光のイメージを観測する。

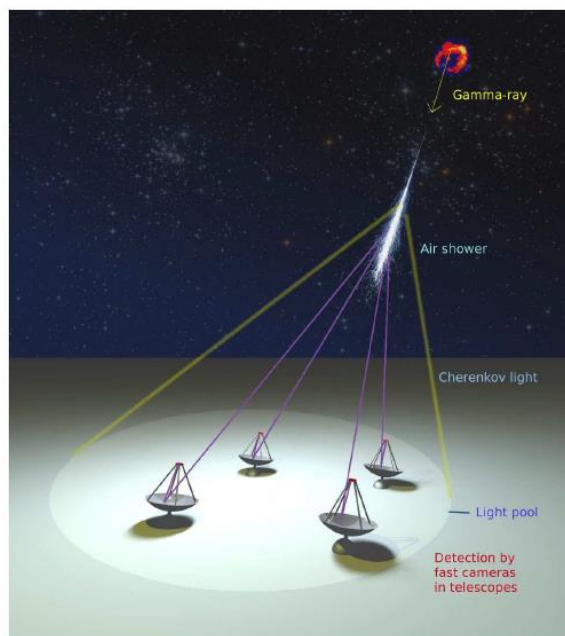


図 7: 地上チェレンコフ望遠鏡によるシャワーのステレオ観測 [10]

チェレンコフ望遠鏡は、望遠鏡視野内にとらえたチェレンコフ光を反射鏡で反射させ、焦点面に集光する。焦点面には光検出器を並べたカメラが設置されており、各ピクセルで捉えた光量に応じた高さの信号を解析することで、シャワーイメージを構築する。

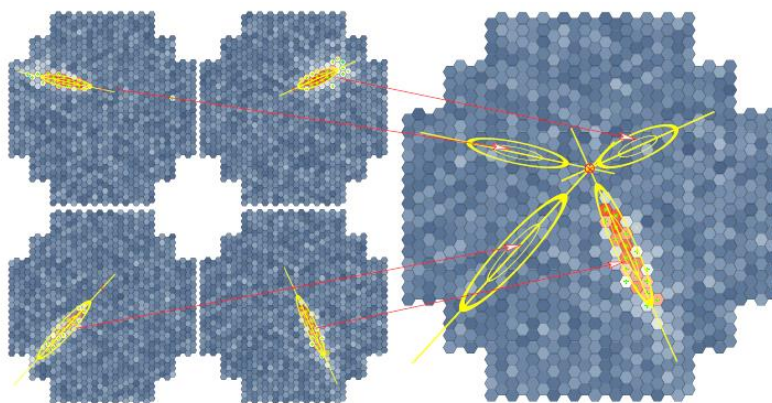


図 8: 望遠鏡カメラにおけるチェレンコフ光イメージ [10] 左図は各望遠鏡が観測したイメージ図、右図は各望遠鏡でのイメージを重ね合わせたもの

図7は、複数台のチェレンコフ望遠鏡で観測したチェレンコフ光のカメラ上のイメージ図である。ある電磁シャワーに対し、各望遠鏡は light pool 内での観測を想定している。これは、light pool 内でチェレンコフ光子の分布はほぼ一定であり、ガンマ線のエネルギーの推定に対し適しているためである。

観測したシャワーのイメージは各望遠鏡のカメラ上で、図8のような楕円形上のイメージとしてとらえられる。この時楕円形は到来方向から地上方向に向かって発展する。各楕円形イメージの長軸を伸ばした交点が、ガンマ線の到来方向として推測される。また、楕円形イメージの光量から、ガンマ線のエネルギーが推定される。

このように地上チェレンコフ望遠鏡は、ガンマ線による空気シャワー由来のチェレンコフ光を観測することで、ガンマ線の観測を行っている。しかし、チェレンコフ光はガンマ線よりもはるかに多く地球に到来する、宇宙線由来のハドロンシャワーによっても放出される。したがって、宇宙線による観測イベントの排除を行うことは重要である。

宇宙線によるハドロンシャワーは、図9のように、大気中の原子核との相互作用や π 粒子の崩壊を含む複雑な過程を経て発達する。このような過程により放出されたチェレンコフ光イメージは、図10右のように、ガンマ線由来のイメージに対し広がったイメージを形成する。そのため、イメージ形状の違いを利用することで、宇宙線による観測イベントの排除を行うことが可能である。[1]

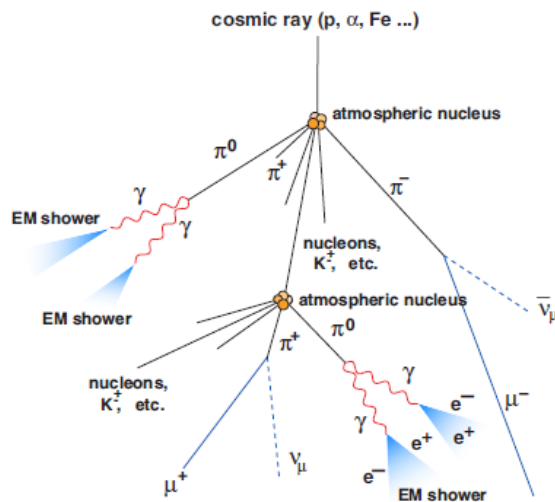


図 9: 宇宙線によるハドロンシャワーの生成 [11]

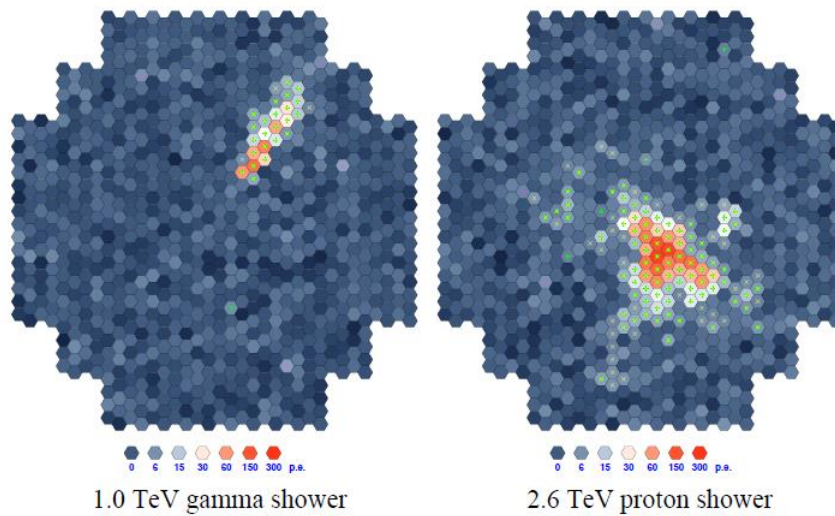


図 10: ガンマ線によるイメージ (左) 宇宙線によるイメージ (右) [10]

2.4 小口径望遠鏡

CTA における小口径望遠鏡 (Small size telescopes(SSTs)) は 1TeV から 100TeV 以上のガンマ線を狙っている。ガンマ線は高エネルギーほど到来頻度が少なくなる。そのため小口径望遠鏡の感度を上げるためには、ガンマ線の有効検出面積を広げ、ガンマ線観測を稼ぐ必要がある。小口径望遠鏡が観測を狙うエネルギー帯では、ガンマ線由来のチェレンコフ光量が大きく、light pool より外側からでも観測が可能となるので、望遠鏡を広い間隔で多数配置して、面積を広げることが観測には効果的である。ただしこのようなチェレンコフ光によるイメージは、カメラ上では望遠鏡の視野中心から離れた位置に現れるため、小口径望遠鏡は広い視野を持つことが必要である。また、有効面積を稼ぐために多数の望遠鏡を設置する必要があるため、小口径望遠鏡には 1 台あたりのコストの削減が特に重要となる。[1]



図 11: Davies-Cotton 光学系 (SST-1M)[12]

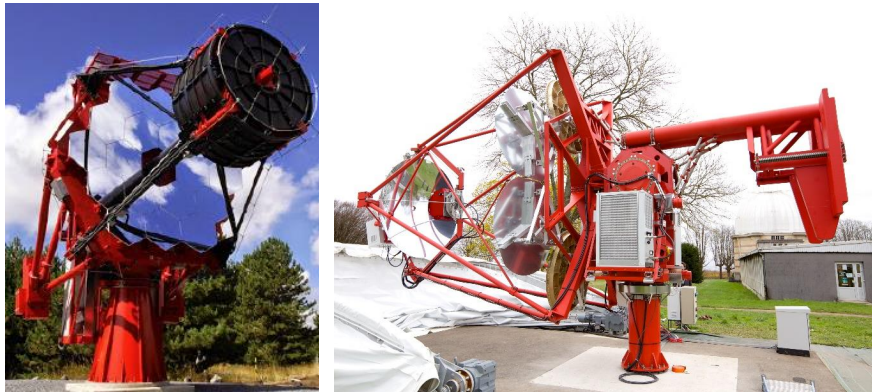


図 12: Schwarzschild-Couder 光学系 (左:ASTRI[12] 右:GCT (写真:奥村暁 (名大 ISEE)))

CTA では小口径望遠鏡のデザインとして、図 11 のような Davies-Cotton 光学系である SST-1M と、図 12 のような Schwarzschild-Couder 光学系である ASTRI¹ と GCT² を提案している。Davies-Cotton 光学系である SST-1M はスイスとポーランドのチームにより開発が進められており、図 11 はその試作である。Davies-Cotton は従来のチェレンコフ望遠鏡で使われてきた光学系であり、焦点距離 f の 2 倍の曲率半径 $2f$ を持つ分割鏡を、焦点から f の長さの球面上に設置する構造を持っている。Davies-Cotton 光学系は、一様なイメージを得られる利点があるが、同時に入射した光に対する同時性を犠牲にしているという特徴がある [1]。

Schwarzschild-Couder 望遠鏡は、ASTRI をイタリアのチームが開発しており、日本のチームは、イギリス、フランス、オランダ、アメリカ合衆国、オーストラリアのチームとともに、GCT の開発に主に携わっている。Schwarzschild-Couder 望遠鏡は、向かい合せた 2 枚の鏡の間に焦点面カメラを設置する構造を持ち、焦点面上でのイメージを縮小することができるという特徴がある [13]。これにより、焦点距離の短縮、多チャンネルの光検出器を用いた焦点面の圧縮及びカメラの小型化による、カメラを支える構造体費用の削減が可能になる。

図 12 は、開発中の Schwarzschild-Couder 光学系の試作望遠鏡である。日本のチームが関わる GCT は、直径 4m の主鏡と直径 2m の副鏡を向かい合せた構造をしており、9 度の視野を実現する。GCT への光学系仕様は表 1 に示す。[1]

表 1: GCT への光学系仕様 [1]

主鏡直径	4 m
副鏡直径	2 m
焦点距離	2.283 m
プレートスケール	0.026 度/mm
視野	9 度
重量	9 トン

¹Astrophysics con Specchi a Tecnologia Replicante Italiana

²Gamma-ray Compact Telescope

現在の GCT の開発状況としては、試作望遠鏡の竣工が完了している、また 2015 年 11 月に最初の試験観測が行われており、宇宙線由来のチェレンコフ光の観測に成功している [14]。さらに、焦点面光検出器の SiPM の選定や次回以降の観測に向けた準備が進められている。

なお、本論文で取り上げる波形記録回路 TARGET は、この Schwarzschild-Couder 光学系のカメラに使用する。カメラについては次章で述べる。

2.5 焦点面カメラ

チェレンコフ望遠鏡では、焦点面に集光したチェレンコフ光イメージを、光検出器で構成されたカメラで観測する。Schwarzschild-Couder 光学系の特徴は、主鏡と副鏡を用いることによる焦点距離の短縮、焦点面の圧縮である。これらは望遠鏡のカメラを支える構造体のコンパクト化、多チャンネル光検出器を焦点面に用いることによるカメラの小型化を実現し、望遠鏡構造体および光検出器 1 チャンネル当たりの費用の削減を可能にする。

図 13 は、GCT のカメラ及びカメラを構成しているモジュールの図である。現在 GCT グループでは、1 辺が 40 センチメートルの焦点面に 2048 のピクセル数を持つカメラ Compact High Energy Camera(CHEC)を開発している [15]。CHEC は 32 本のカメラモジュールから構成されており、モジュール 1 本あたり 64 ピクセルが割り当てられている。光検出器の後段には 16 チャンネルのプリアンプが搭載されたボードが 4 枚接続されている。プリアンプボードからリボンケーブルを介したさらに後段には、16 個の入力チャンネルを持つ波形記録回路 TARGET が搭載されたボードがそれぞれ接続されており、光検出器の各ピクセルが検出したデータを、ピクセル毎に TARGET の各チャンネルに記録する。CHEC ではこのように、独立したモジュールを組み合わせることにより、故障時やモジュールのアップグレード時の交換を容易にしている。

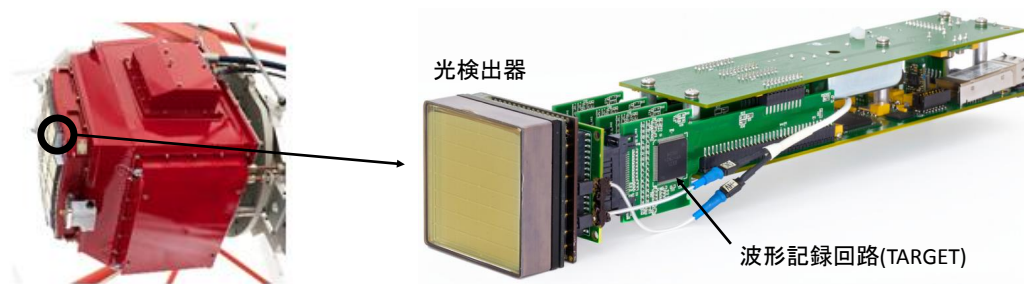


図 13: CHEC (左、写真:奥村暁 (名大 ISEE)) とカメラモジュール (右、Albert et al. (2016) in prep.)

CHEC の主な仕様は、表 2 に示すとおりである。

2.6 カメラの光検出器

前章のカメラモジュールに接続する多チャンネル光検出器には、Silicon Photomultipliers(SiPM)と呼ばれる半導体光電子増倍素子が採用される [16]。以下では SiPM の特徴について述べる。

表 2: CHEC の主な仕様 [1]

画素数	2048
モジュール数	32
モジュールあたりの画素数	64
平均画素ピッチ	6.4 mm (0.17 度相当)
視野	8 度 (35 cm)
重量	75 kg
消費電力	450 W

2.6.1 アバランシェ・フォトダイオード

SiPM はアバランシェ・フォトダイオード (APD) と呼ばれる光検出器を複数集合した構造をしている [17]。APD は、逆電圧を印加することで光電流を増倍させるフォトダイオードである。図 14 は、APD の光電流増倍の原理を示したものである。

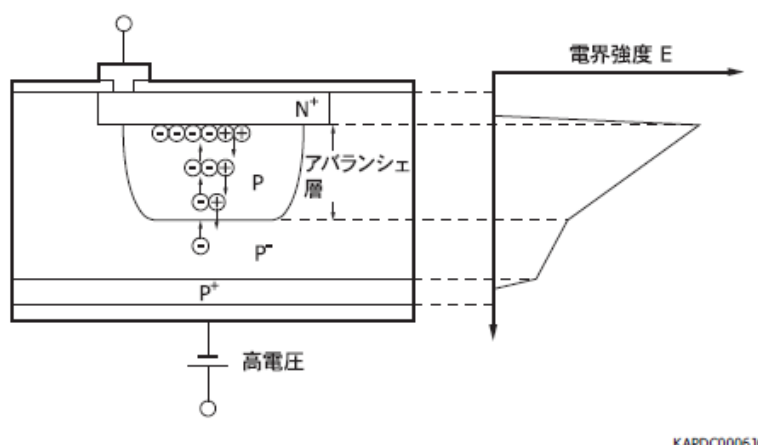


図 14: APD の光電流増倍原理 [17]

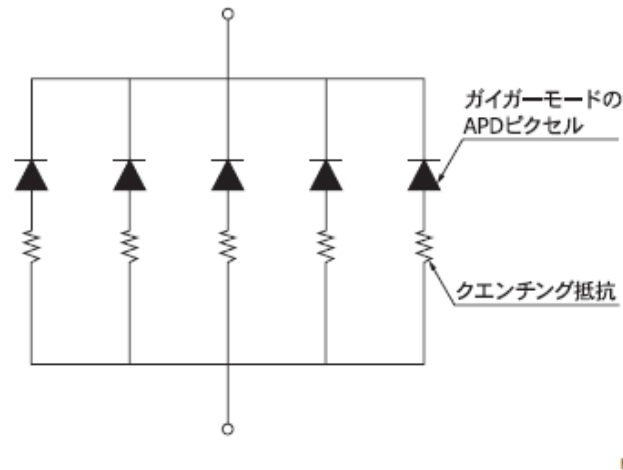
APD は、図 14 のように p 型と n 型半導体を組み合わせた構造をしている。このような構造では、p 型と n 型の接合部分で電子が p 型方向に、正孔が n 型方向に押し出される。すると接合部分では電子も正孔も不足した空乏層が生じる。APD に逆電圧を印加した状態で、バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光が入射すると、空乏層内で電子・正孔対が発生する。発生した電子・正孔対はそれぞれ n 側、p 側に向かって、空乏層内の電界によって加速される。この時、十分加速された電子が半導体内の原子と衝突すると、新たに電子・正孔対が生まれる。これを繰り返すことにより、電子・正孔対がなだらかに発生する現象を、アバランシェ増幅という。

また、APD に印加する逆電圧を大きくしていくと、やがて降伏電圧と呼ばれる値に達する。降伏電圧では入射光量の大きさに関係なく、光の入射によってガイガー放電と呼ばれる APD の飽和出力が発生する。このように APD を降伏電圧以上で動作させる状態をガイガーモードと呼び、ガイガーモードでは、1 光子の検出時においても飽和出力を得られることが特徴である。

以上をまとめると、APDの特徴は、素子内に信号の増倍機能を持つため、比較的高いS/Nで動作させることが可能である点が挙げられる。またガイガーモードでは1光子の微弱な光の入射に対しても、アバランシェ増幅による飽和出力が発生するように、1光子単位での光量測定が可能である。このようなAPDの光検出性能は、CTAで観測する微弱なチェレンコフ光の検出、光量解析等の面において非常に適したものである。

2.6.2 SiPM

SiPMは、ガイガーモードのAPDを複数集合した構造をしている。図15は、SiPMのあるチャンネルの受光面における回路構造の図である。実際のSiPMには、1チャンネルあたりに数千個のガイガーモードAPDが使用されている。図15のAPDに直列に接続されたクエンチング抵抗は、ガイガー放電直後にAPDの動作電圧を下げ、ガイガー放電を止めるためのものである。この抵抗により、APDは次の光子の検出が可能になる。



KAPDC00293A

図 15: SiPM の構成図 [17]

ここでは、SiPMのある1チャンネルについて考える。1チャンネル内のガイガーモードAPDピクセルは、それぞれが光子検出時に同じパルスを出力する。各APDピクセルが出力したパルスはチャンネル内で加算され、これが1チャンネルの出力となる。つまり、1チャンネル内の2個のピクセルが同時に光子を検出した時、このチャンネルは、2つのパルスを重ね合わせた高さのパルスを出力する。したがって、SiPMは入射光子の数を計測することが可能である。

2.7 TARGET

TARGET³は、望遠鏡のカメラが観測した信号波形を記録する、特定用途向け集積回路(application specific integrated circuit(ASIC))である。TARGETは1素子あたり16個の読み出しチャンネルを持ち、サンプリング回路とデジタル化回路が統合された、コンパクトな集積回路である[18]。TARGETは1チャンネルあたり約70mWという低消費電力での動作が可能であり[19]、複数の読み出しチャンネルを持つことでチャンネル当たりの費用の削減を可能にし、カメラ全体の

³正式には the TeV Array Readout Electronics with GSa/s sampling and Event Trigger

費用の軽減にも貢献している。また、TARGET は光検出器から出力された信号に対し、0.4GHz、1.0GHz でのデジタル化が可能である⁴。これは大気チェレンコフ光由来の数ナノ秒の信号に対し、ナノ秒単位の高速サンプリング化可能なことを表しており、信号の時間情報の利用が期待できる性能である。

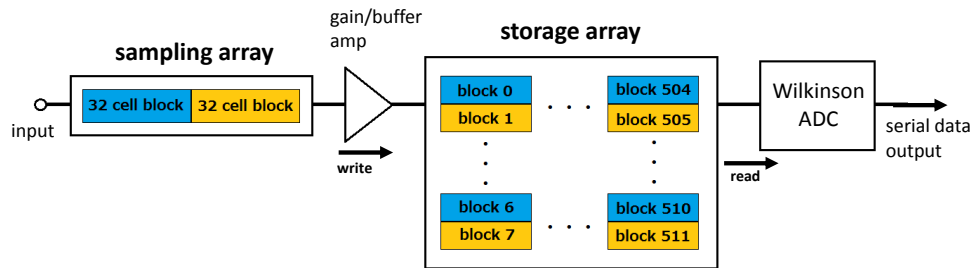


図 16: TARGET の内部構造 [20]

図 16 は、TARGET (バージョン 7) の内部構造の図である [20]。TARGET の主要な構造はサンプリング部分とデータ記録部分であり、それぞれ sampling array、storage array と呼ばれている。sampling array は図 17 のように、64 個のコンデンサ (記録セル) を並列に並べた構造をしている [21]。各記録セルにはスイッチが設けられており、TARGET は入力信号に対しスイッチを 1 ナノ秒ごとに切り替えることで、1GHz の高速度サンプリングを行っている。

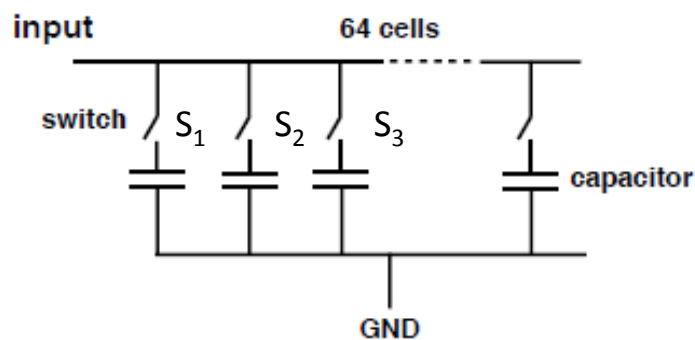


図 17: sampling array の構造 [21]

図 16 に示す TARGET のサンプリングにおいて、sampling array の 64 個の記録セルは、32 個ずつのブロックごとに操作される。サンプリング開始のタイミングは、TARGET ボードに搭載されている、field programmable gate array (FPGA) と呼ばれる集積回路からのトリガーにより制御している [18]。前半ブロックの先頭のセルは FPGA からの周期的なトリガーを受け取る度に 1 番目のセルからサンプリングを開始する。この時後半のブロックは後段の storage array に記録データを送信している。その後、後半ブロックがサンプリングを始めると、今度は前半ブロッ

⁴ただし、実際の観測では 1.0GHz の設定を使用する。

クが storage array にデータを送信する。TARGET はこのように、2 個のブロックが交互にサンプリングとデータ送信を行うことで、連続的なサンプリングを行っている。

sampling array が記録したデータは、整形・増幅アンプを経由した後、storage array に記録される。storage array は sampling array 同様 32 個の並列コンデンサアレイを 1 ブロックとする構造をもっており、sampling array から受け取ったデータを順々に記録していく。storage array に読み出しトリガーがかかると、任意のブロックのデータは wilkinson ADC と呼ばれるアナログデジタルコンバータを経由し、次々と読み出される。実際の観測では、光検出器の隣り合う $2 \times 2 = 4$ ピクセルの出力の和を用いてトリガーの出力を判断している。4 ピクセルの出力和がしきい値を超えると、読み出しトリガーが出力され、TARGET は storage array の中からしきい値を超えたデータを取得した時刻を選択し、データを読み出す。また、このとき同時観測を行っていた別の小口径望遠鏡にも読み出しトリガーを送り、 $<6\text{-}10\text{ns}$ の範囲⁵ で検出したチェレンコフ光由来の信号を、同一のイベント由来のもののみならず読み出し、チェレンコフ光イメージのステレオ観測を行う [15]。

TARGET は、トリガー回路が読み出しトリガーの出力を判断している際、及び別の小口径望遠鏡との通信中もサンプリングを続けている。そのため、データの読み出しトリガーがかかった時刻まで遡れるだけの、十分なデータ長さを保持しておくことが必要である。ここで storage array は、最大約 $16\mu\text{s}$ のサンプリングデータを保持することができる。これは、トリガーの出力を判断した直後から、しきい値を超えたデータを取得した時刻までさかのぼって読み出し、同時観測の判定を行うために、十分なデータ長さとなっている。

表 3: 各 TARGET の仕様 [20]

	TARGET 5	TARGET 7	TARGET C + CCTV ^a
Characteristics			
Number of channels	16	16	16
Sampling frequency (GSa/s)	0.4 – 1	0.5 – 1	0.5 – 1
Size of storage array (cells/channel)	16,384	16,384	16,384
Digitization clock frequency (MHz)	~700	208	500
Samples digitized simultaneously	32×16	32×16	32×16
Trigger (sum of 4 channels)	integrated	integrated	companion
Performance			
Dynamic range (V)	1.1	1.9	$\gtrsim 1.9$
Integrated non linearity (mV)	75	40	$\lesssim 40$
charge linearity range (p.e.)	4 – 300	$1 - \gtrsim 300$	$1 - \gtrsim 300$
charge resolution at 10 p.e.	8%	4%	4%
charge resolution at > 100 p.e.	2%	$\lesssim 0.8\%$	$\lesssim 0.8\%$
Minimum trigger threshold (mV) ^b	20	50	4.5
Trigger noise (mV) ^b	4	15	0.5

TARGET は現在も改良を重ねており、様々なバージョンのものが存在する。本研究では、TARGET5、TARGET7、TARGETC について実験を行い、その性能を評価した。表 3 は、本研究に用いた TARGET の仕様を示す。なお、TARGET5、TARGET7 は、同一 ASIC にサンプリング回路、デジタル化回路、データ読み出し回路、トリガー回路が搭載されている一方、TARGETC はサンプリング、デジタル化、データ読み出し回路のみを搭載し、トリガー回路は CCTV⁶ というトリガー回路用 ASIC に切り離している [20]。

CCTV は TARGET7 のトリガー回路のパフォーマンスが ASIC のデザインにより制限されてしまうことを受けて開発されたものであり、2015 年から動作試験および評価が行われている最中に

⁵CTA の要求値

⁶正式には Cherenkov Companion Trigger Variant).

ある。CCTV は TARGETC の各入力チャンネルに対応した 16 個の入力チャンネルを持っており、光検出器から受け取った信号の出力和から読み出しトリガーを生成するために使用される。

なお、本測定で使用した各 TARGET 評価ボードの写真は、図 18 に示したとおりである。

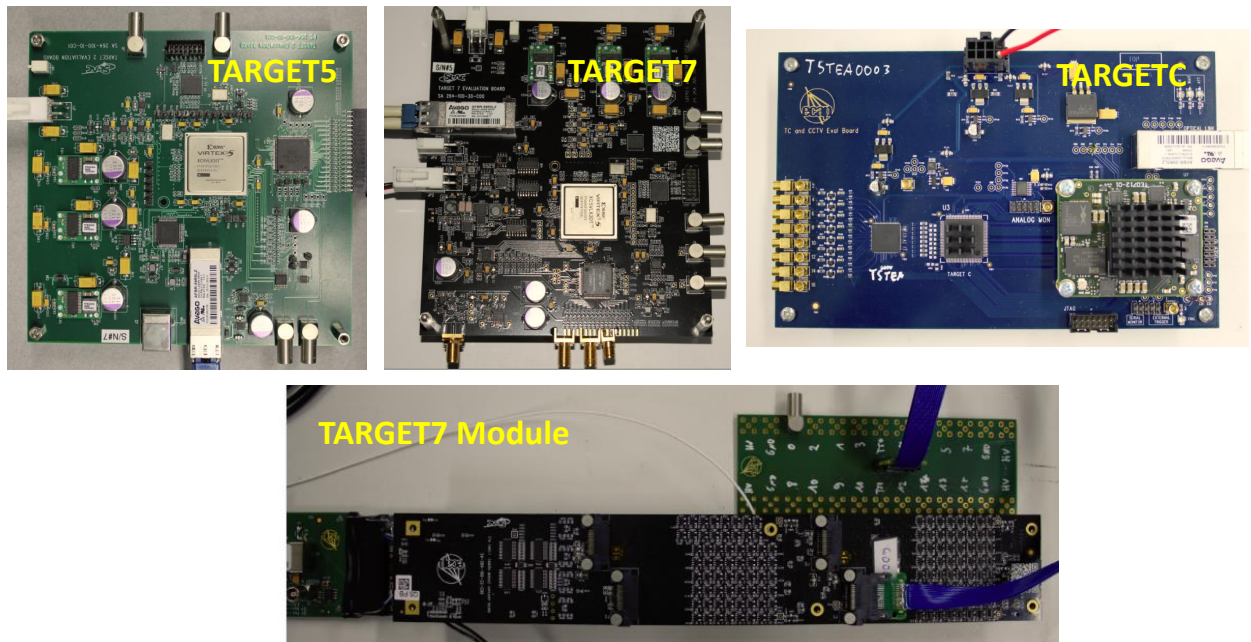


図 18: 本測定で使用した各 TARGET の写真

2.7.1 TARGET の時間応答特性

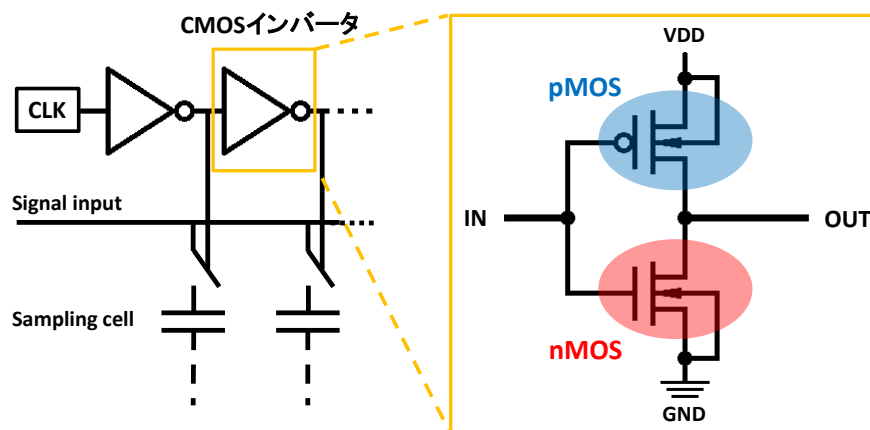


図 19: サンプルセル周りの回路及び CMOS インバータの構造

2.7 章で述べたように、TARGET は 64 個のサンプルセルを次々と切り替えることで、1ns 刻みの高速サンプリングを行っている。図 19 は、TARGET のサンプルセル周りの回路を簡略

化したものである。信号入力ラインとサンプリングセルの間には MOS トランジスタによるスイッチが存在し、切り替え信号を受け取る毎に任意の時間だけ ON 状態になる。TARGET が 1.0Hz でサンプリングをしている場合、スイッチは 1ns 毎に次々と隣のセルのスイッチを ON 状態に切り替える。この時 TARGET に信号入力があると、各サンプリングセルに次々と電荷が蓄積される。[22]

各サンプリングセルのスイッチの切り替え信号を生成しているのが、図 19 の CMOS インバータと呼ばれる遅延回路である。図 19 のクロックからトリガーパルスが出力されると、CMOS インバータはパルスのタイミングを遅延させながら、次々と隣のインバータにパルスを伝達する。各 CMOS インバータはサンプリングセルのスイッチと並列につながっており、クロックに対し遅延して出力された信号は、出力と同時にサンプリングセルのスイッチを ON 状態に切り替え、入力信号のサンプリングが行われる。[23][24]

ここで CMOS インバータについて詳しく述べる。CMOS インバータとは、デジタル回路における論理回路の一つで、図 19 右のように pMOS トランジスタと nMOS トランジスタを組み合わせた構造を持つ [25]。CMOS インバータは図 20 で示すように、入力電圧がトランジスタのしきい値を超えた High の時は Low を出力し、入力電圧が Low の時は High を出力する。ここで CMOS インバータへの入力パルス信号の立ち上がりは過渡現象であり、Low 電圧から High 電圧や High 電圧から Low 電圧には瞬間的に変わるのではなく、時間変化をする [24]。するとクロックからのパルス入力のタイミングに対する CMOS インバータの反応は、パルスの立ち上がり時間および立ち下がり時間に依存した遅延が生じる。TARGET のサンプリングセルの切り替えはこの遅延を利用している。CMOS インバータを直列につなぐことで、クロックからのパルスを遅延させながら順々に隣のインバータに伝達し、サンプリングセルを順々に切り替えている。さらには各インバータのパルスの立ち上がり時間を調節することで、遅延時間を調節することが可能である。

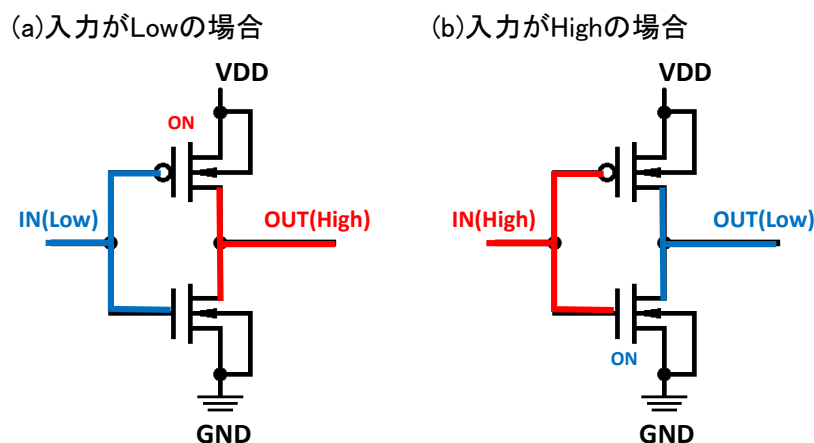


図 20: CMOS インバータの応答

ここで TARGET の CMOS トランジスタの遅延時間調節について述べる。TARGET では図 21 に示すように、CMOS インバータの pMOS トランジスタ、nMOS トランジスタ側にそれぞれ、電圧供給ライン (VadjP、VadjN) が接続されている [25]。

CMOS インバータの遅延時間は、入力パルスの立ち上がり時間および立ち下がり時間に依存する。TARGET では VadjP 供給電圧を変化させることでパルスの立ち下がり時間を調節し、VadjN

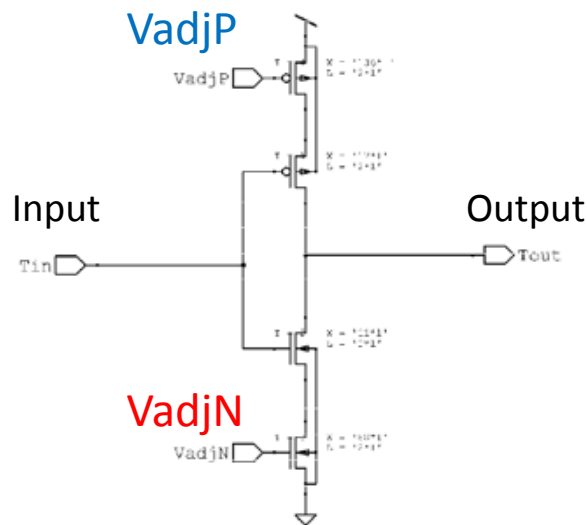


図 21: TARGET の CMOS インバータの構造 [25]

供給電圧を変化させることでパルスの立ち上がり時間を調節している。これにより CMOS インバータの遅延時間を調節している。ただし遅延時間の調節は、パルスの立ち上がりまたは立ち下がり時間のどちらかを変化させるだけで可能である。TARGET では通常、 V_{adjP} の値を固定し、 V_{adjN} を変化させることで、遅延時間を調節している。 V_{adjN} 、 V_{adjP} は全ての CMOS インバータで共通の値を使っており、応答時間を一括で調節することが可能である。

CMOS トランジスタの応答時間は、トランジスタの製造過程で生じる、構造上のばらつきにも依存する。本章における時間応答特性は、このばらつきによるものを指す。トランジスタの大きさや、ドーピングの際の不純物濃度のばらつきは、トランジスタのゲート容量や抵抗値のばらつきにつながり、応答時間に影響を与える [26]。トランジスタの構造上のばらつきは各トランジスタで固有のものであるため、トランジスタ毎に異なる固有の応答時間ばらつきを与える。これにより図 22 のように、理想的には 1ns で正確に切り替わるはずのサンプリングセルは、セル毎に 1ns より長くなったり、短くなったりする。

V_{adjP} 、 V_{adjN} による調節は全セル一括で行うため、このばらつきの補正はできない。セル毎の応答時間ばらつきを補正するためには、TARGET から出力したデータの時間情報を用いて、セル毎の応答時間ばらつきを算出することが必要である。今回使用した TARGET は、64 個のサンプリングセルを何度もループさせて波形の記録を行っているため、セル毎の応答時間ばらつきには 64 セル毎の周期性が確認できるはずである。

dt_i: サンプル時間幅

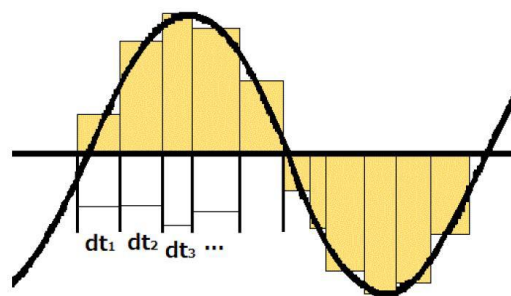


図 22: 応答時間ばらつきのあるセルによるサイン波サンプリングの例

3 TARGET の応答時間ばらつきの補正

3.1 応答時間ばらつきの測定意義

2.8 章で述べたように、TARGET のサンプリングセルには、セル毎に応答時間のばらつきがある。セル毎の応答時間のばらつきにより、TARGET から出力した波形は時間情報が不正確になり、入力波形に対し歪んだ形となる。出力波形の時間情報は、例えば以下のような研究に関わる。

(a) 信号の観測時間情報を用いたガンマ線到来方向の推定

小口径望遠鏡が観測エネルギー帯にある 10 TeV 以上のガンマ線によるチェレンコフ光は、ライトプール外でも十分観測できる光量を持つ。そのため、望遠鏡アレイから離れた位置にライトプールの中心があるイベントも検出することで、到来数の少ない高エネルギーガンマ線に対する有効面積を広げることができる [1]。しかし、このようなイベントは図 23 に示すように、複数台で観測したイメージの長軸が成す角が小さくなる。このような状況は、第天頂角なイベントにおいても起こり得る。すると長軸決定の誤差の影響を受け、ガンマ線の到来方向の決定精度が悪くなる。また楕円形イメージ長軸の交点をガンマ線の到来方向とするため、長軸が決定できるイメージの数は最低でも 2 つ必要である。しかし望遠鏡視野の端に現れるようなイベントは、長軸の決定が難しい場合がある。

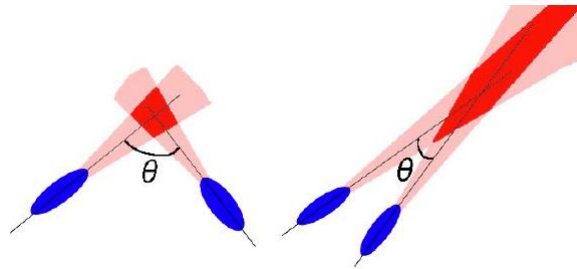


図 23: チェレンコフ光イメージ長軸の交点決定精度は、 θ が小さくなるほど悪くなる。[27]

そこで CTA では、確率密度分布およびチェレンコフ光イメージの時間情報を利用した、ガンマ線到来方向の再構築手法を提案している [28][29]。この方法では、チェレンコフ光量重心とガンマ線ソースとの角度距離の関係を、モンテカルロシミュレーションを用いて予測し、これに基づいてガンマ線ソース位置の確率密度分布を計算する。加えて、チェレンコフ光量重心位置とガンマ線ソースとの距離が、チェレンコフ光イメージの時刻勾配 (Time Gradient (T.G)) に依存することを利用して、ガンマ線ソース位置の決定精度を向上させ、望遠鏡の角度分解能を向上させる。T.G とは、楕円形イメージの長軸方向に沿って、イメージを撮像したカメラの各ピクセルについての光量ピーク時刻の分布を求め、その勾配を求めたものである。参考資料 [28] の解析では、横軸をイメージ長軸方向 x 、縦軸を光量ピーク時刻 t とする座標系に、イメージを撮像したカメラの各ピクセルのデータをプロットし、出来上がった散布図を $t = mx$ でフィッティングした時の m の値を T.G としている。これらの方法は原理的には、1 つの楕円形イメージからもガンマ線ソース位置を予測することが可能であり、イメージを観測した望遠鏡数が少ない場合のソース位置の予測精度向上に有効である。[29]

図 24 は、イメージ長軸交差法と T.G+確率密度分布を用いた解析について、再構成されたガンマ線ソース位置の 80% を含む半径を比較した図である [28]。確率密度分布および T.G を用いることで、特にイメージを観測した望遠鏡数が少ない場合に、ガンマ線ソース位置の再構築精度が向上しており、望遠鏡の角度分解能向上に寄与していることが分かる。望遠鏡の角度分解能の向上は、例えば広がったソース天体の詳細な形状や、今まで 1 つの天体とされていたものが、実は 2 つの天体が重なっていたものであったというような、新しい発見につながる。

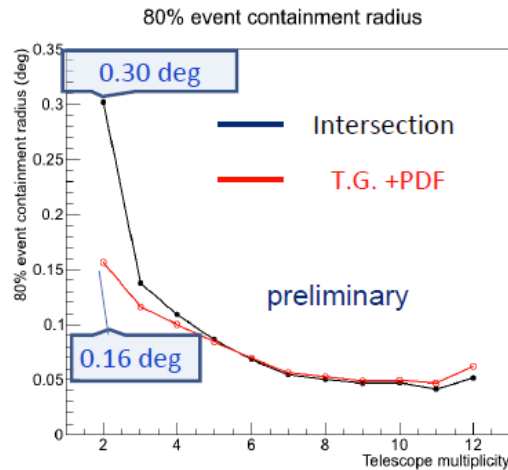


図 24: イメージ長軸交差法と、T.G+確率密度分布を用いた解析の、イメージ観測望遠鏡数に対するガンマ線ソース位置の再構成精度の比較 [28]

図 25 は、T.G 情報を用いたチェレンコフ光量重心に対するガンマ線ソース位置の確率密度分布のシミュレーション例である。チェレンコフ光イメージの時間情報解析では、サブナノ秒単位で時間情報を利用するため、望遠鏡カメラに搭載される波形記録回路の応答時間は、サブナノ秒単位の補正が必要である。

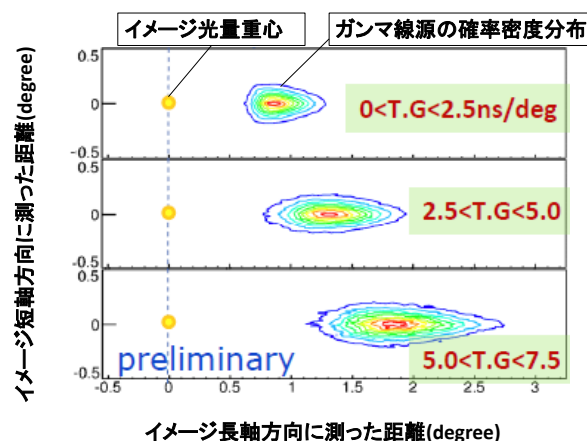


図 25: モンテカルロデータを使って求めたガンマ線ソース位置の確率密度分布 [28]

(b) 観測信号の時間積分によるガンマ線のエネルギーの推定

チェレンコフ望遠鏡のパフォーマンスにおいて、ガンマ線のエネルギー分解能の向上は、天体の発見及び同定を行うためには不可欠である。例としてCTAで狙っているダークマターの探索では、ダークマターの候補となる粒子の対消滅により、100GeVから10TeVの範囲に、対消滅のラインスペクトルが見られると予測されている[1]。ダークマター由来のラインスペクトルを観測するためには、エネルギー分解能の向上が非常に重要となる。

ガンマ線のエネルギーは、望遠鏡が観測したチェレンコフ光イメージの光量に依存するため、ガンマ線エネルギー分解能の向上には、チェレンコフ光量分解能の向上が重要である。望遠鏡が観測したチェレンコフ光量データは、カメラのピクセル毎に電圧値の時間変化のデータとして保存される。しかし図26が示すように、応答時間にばらつきがあると、測定された波形は理想的な応答による波形から歪んでしまう。ガンマ線のエネルギーの算出には、各ピクセルの電圧値の時間積分した値を用いるため、応答時間の補正によるばらつきの軽減は必要である。

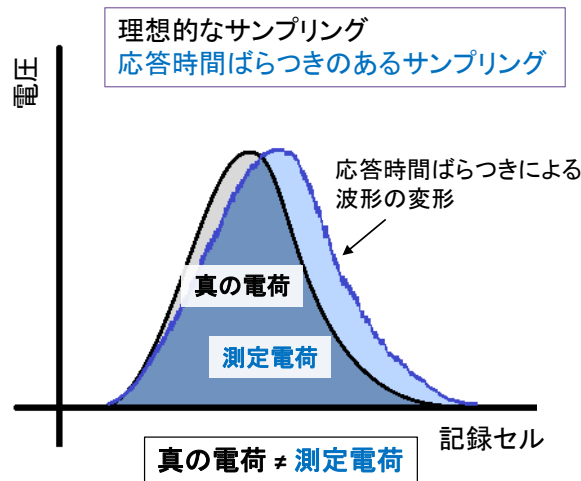


図 26: 応答時間ばらつきによる波形の変形

図27はシミュレーションにより求めた小口径望遠鏡の電荷分解能である。この図では、シミュレーションで生成したチェレンコフ光の真の光子数 Q 、小口径望遠鏡のカメラでとらえたチェレンコフ光の1ピクセルあたりの光子数のばらつき σ_Q とした時の、 σ_Q/Q を電荷分解能としている。チェレンコフ光の観測は通常ライトプール内で行うことを考えると、ガンマ線のエネルギーが大きければライトプール内に落ちる光子の数が増え、望遠鏡のカメラ1ピクセルが観測する光子数も大きくなると考えられる。するとこの図において Q が大きい場合は、観測したガンマ線のエネルギーも大きいと考えられる。

図27の Q が1000p.e.を超えてくると、電荷分解能の目標値は5%以下となっている。光子数が大きいイベントにおいては、取得した信号の波高値が飽和してしまうため、波形のフィッティングにより補正を行う。この時の電荷分解能は、目標値の5%より大きく、まだ改善の余地がある。したがって、応答時間ばらつきを補正した電荷分解能が5%よりも小さければ、飽和した値における真の光子数の値は、信号のフィッティングにより求められる。本論文では、応答時間ばらつき補正により、TARGETの電荷分解能がどの程度改善できるかについても言及する。

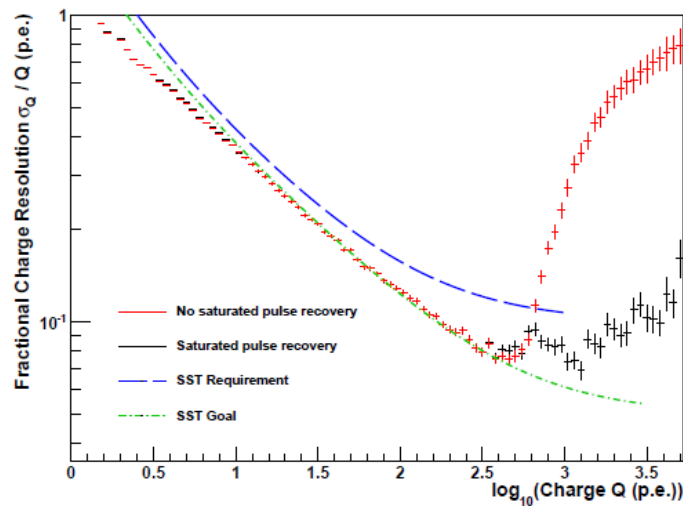


図 27: シミュレーションによる小口径望遠鏡の電荷分解能。赤: 取得データの補正なし、黒: 光量が飽和している波高データをフィッティングにより補正した場合、青: 要求値、緑: 目標値 [30]

3.2 応答時間ばらつきの測定

TARGET の応答時間ばらつき測定は、TARGET ASIC を搭載した波形読み出しボード (以下 TARGET ボード) にファンクションジェネレータから周期的な波形を入力し、適当なサンプリング速度、読み出しデータ長でサンプリングしたデータを用いて行う。TARGET のサンプリング速度や、読み出しデータの長さの設定は、TARGET ボードに搭載されている FPGA により行っている [18]。FPGA は PC からのコマンドを受けすることで、例えば 2.7 章で述べた TARGET ASIC へのサンプリングトリガーの送信や、TARGET からのデータ読み出しトリガーの送信、任意の素子へ電圧を印加することによるサンプリング周波数の調節等を行っている。

ここで、応答時間ばらつき測定に関わる数値 (DAC 値、ADC 値) について述べる。PC からのコマンドを受けて FPGA が出力する電圧値等の大きさは、TARGET ボードに搭載された digital to analog converter(DAC) が制御している。DAC は PC からのデジタル信号入力に対応したアナログ電圧信号を出力する。この時 PC 側で行う入力デジタル信号の設定値を DAC 値と呼ぶ。

TARGET からのデータの読み出しは、FPGA からデータの読み出しトリガーを受け取ると始まる。TARGET がデータの読み出しトリガーを受け取ると、TARGET の storage array を構成しているストレージセルが保持していた電圧値データは、analog to digital converter(ADC) によりデジタル化され、ADC 値と呼ばれるデジタル値で読み出される [18]。

図 28 は、TARGET で使用している ADC である、wilkinson ADC の動作を表す図である [31]。wilkinson ADC では、ストレージセルが保持していた電圧 V_{in} が入力されると、ランプ電圧 V_{ramp} が一定の変化率で上昇し始める。また、 V_{ramp} が上昇し始めると同時にクロックが出力している一定の周波数のパルスを、カウンターが数え始める。やがて V_{ramp} の値が V_{in} に等しくなると、その瞬間 V_{cmp} が出力され、カウンターが止まる。カウンターの値は V_{in} の高さに比例しているため、この時のカウンターの値が ADC 値となる [18]。

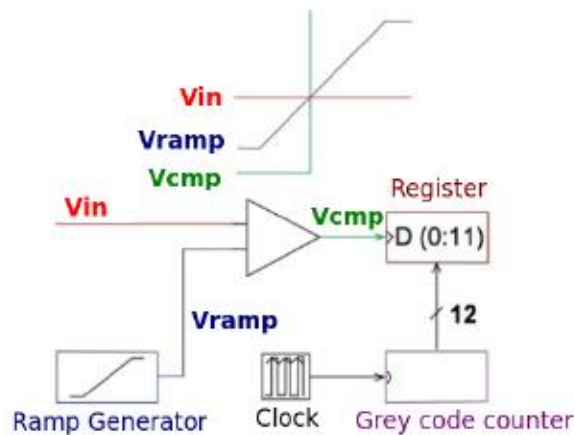


図 28: wilkinson ADC の動作原理 [31]

TARGET から出力したデータは、入力電圧値に対し ADC 値で出力される。入力電圧値に対する ADC 値は storage array を構成するストレージセル毎に異なるため、TARGET の応答時間ばらつきを測定するためには、ADC 値を電圧値に直す必要がある。また、TARGET から読み出した値には DAC 値で設定したオフセット電圧値が加算されているため、DAC 値も電圧値に直す必要がある。そこで本測定では、応答時間ばらつきの測定を、1,DAC 値の電圧値変換、2,ADC 値の電圧値変換、3、応答時間ばらつきの算出、の 3 段階で行う。以下では、TARGET ボード周辺の接続環境について述べた後、DAC 値、ADC 値の電圧値変換および応答時間ばらつきの測定原理について述べる。

3.2.1 測定環境

TARGET でデータサンプリングを行うためには、データの読み出し用 PC に、TARGET の制御、データ取得を行うためのソフトウェアである libTARGET または TargetDriver と TargetIO をインストールする必要がある。各ソフトウェアは TARGET のバージョンごとに使用できるものが決まっており、本研究では TARGET5 および TARGET7 に libTARGET[32] を使用し、TARGETC と 4 章の TARGET7 カメラモジュールには TargetDriver と TargetIO を使用している。libTARGET は TARGET の動作評価のためのものであるが、TargetDriver および TargetIO は TARGET の動作の評価に加え、実際に望遠鏡を動かすことを想定した構成にアップデートされたものである。また TargetDriver は TARGET の初期設定用、TargetIO はデータ取得用のソフトウェアで、通常はセットで使用する。libTARGET はどちらも含まれたソフトウェアである。

今回の測定では、Scientific Linux6.6 が OS の PC に上記のドライバをインストール⁷し、データを取得した。また TARGET5 は Windows7 の PC にインストールした、VMware 用仮想 OS の Scientific Linux6.6 でデータを取得した。ただし、VMware 仮想環境では、メインの OS である Windows と仮想環境との通信の問題により、TARGET からデータの読み出しが滞る問題が出たため、TARGET7、TARGETC の測定では使用していない。周辺接続環境の詳細は図 29 に示す。また、本測定で使用した信号発生器 (KEITHLEY 製 3390) の仕様は、表 4 に示す。

⁷インストールの詳細は付録Aに記述

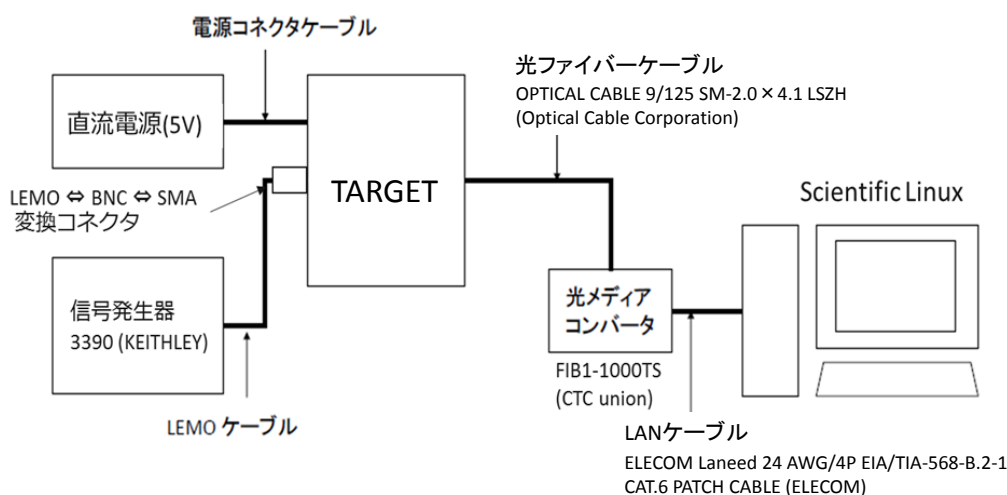


図 29: TARGET 周辺接続環境

表 4: TARGET 周辺接続環境

ファンクションジェネレータの仕様	
サイン波全高調波ひずみ	<0.06%
パルスオーバーシュート	<2%
パルス波ジッタ(RMS)	300ps±周期の0.1ppm
振幅確度(1KHz)	設定の1%±1mVpp
周波数分解能	1μHz

3.2.2 DAC 値の電圧値変換

2.7章で述べたように、TARGETのサンプリングセルが取得したデータは、サンプリング回路後段のストレージセルに記録される。入力電圧に対するTARGETの出力ADC値特性はストレージセル毎に異なるため、まずはセル毎にADC値を電圧値に変換する必要がある。各セルのADC値と電圧値変換式を導出するためには、TARGETに直流電圧を入力し、出力ADC値と比較することが有用であるが、TARGETボードは入力部分のカップリングコンデンサにより直流成分がカットされる。

そこで、TARGETボード上で生成される、オフセット電圧(V_{ped})を使用する。 V_{ped} は通常、TARGETのダイナミックレンジの中間値に設定する[18]。これはADCが正の値を出力するのに対し、入力信号は交流成分しか残らないので、測定できる交流の振幅を最大にすることが目的である。本測定では、 V_{ped} の変化に対する出力ADC値を測定することで、電圧値とADC値の関係を求めた。

ただし、 V_{ped} の設定値はDAC値で設定する。そのため、ここではまず V_{ped} のDAC値に対する電圧値を測定した。 V_{ped} の電圧値はTARGETボード上の V_{ped} モニタリングピンで、テスター

を用いて測定した。なお、TARGET5の V_{ped} 測定にはテスターとしてHOZAN社製のDT-121(確度: $\pm 1.3\%rdg + 3dgt$)を用い、TARGET7、TARGETCにはFLUKE社製の175(確度: $\pm(0.15\% + 2)$)を用いた。

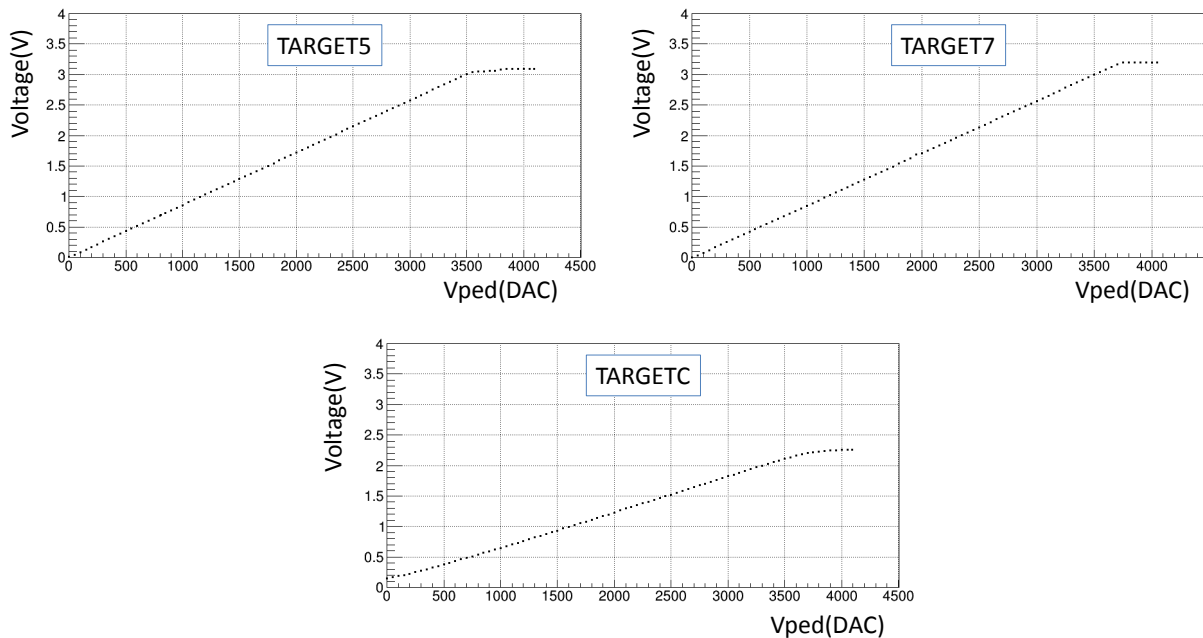


図 30: 各 TARGET の $V_{ped}(\text{DAC})$ と電圧値の関係

図 30 は、TARGET5、TARGET7、TARGETC における $V_{ped}(\text{DAC})$ と電圧値の関係の図である。TARGET5 および TARGET7 では、全ての入力チャンネルで V_{ped} 値は共通であるが、TARGETC ではチャンネル毎に設定が可能であるため、TARGETC では以降の測定で使用するチャンネル 1 の V_{ped} 値を測定した。図 30 より、本実験では V_{ped} の DAC 値に 2000 を使用し、最大振幅が 500mV_{pp} のサイン波入力を行うが、この範囲で良い直線性を示している。DAC 値が 3500 を超えると電圧値は頭打ちとなるため、本実験では直線部分を一次関数でフィッティングし、DAC 値と電圧値の変換式を導出した。以下はそれぞれ TARGET5、TARGET7、TARGETC の電圧値 (V) の導出式である。

$$\begin{aligned}
 Voltage_{T5} &= 0.000854 \times DAC + 0.00443 \\
 Voltage_{T7} &= 0.000858 \times DAC + 0.00779 \\
 Voltage_{TC} &= 0.000591 \times DAC + 0.00433
 \end{aligned} \tag{8}$$

なお、本研究では TARGET5 のフィッティングは V_{ped} の DAC 値が 0 から 850 の範囲で行った。これは初期の研究で使用していた値である。また TARGET7 のフィッティングは DAC 値が 0 から、電圧値が頭打ちになる直前の DAC 値 3600 の範囲で行った。TARGETC では、後の ADC 値の取り得る範囲から電圧値の取りうる範囲を見積もり、DAC 値 1100 から 3300 の範囲でフィッティングを行った。TARGET の DAC 値に対する電圧値の関係は、取り得る電圧値の範囲のみで行えば十分であるため、TARGET5 及び TARGET7 のフィッティング範囲は、今後修正が必要である。

3.2.3 ADC 値の電圧値変換

3.3.2 章で述べたように、TARGET の ADC と電圧値の関係は直接求めることができない。そのため、Vped (DAC) を変更し、DAC 値とセル毎の ADC 値の関係を求めた上で、前項の DAC 値と電圧値の関係から DAC 値を電圧値変換し、セル毎 ADC 値と電圧値の関係を導出した。

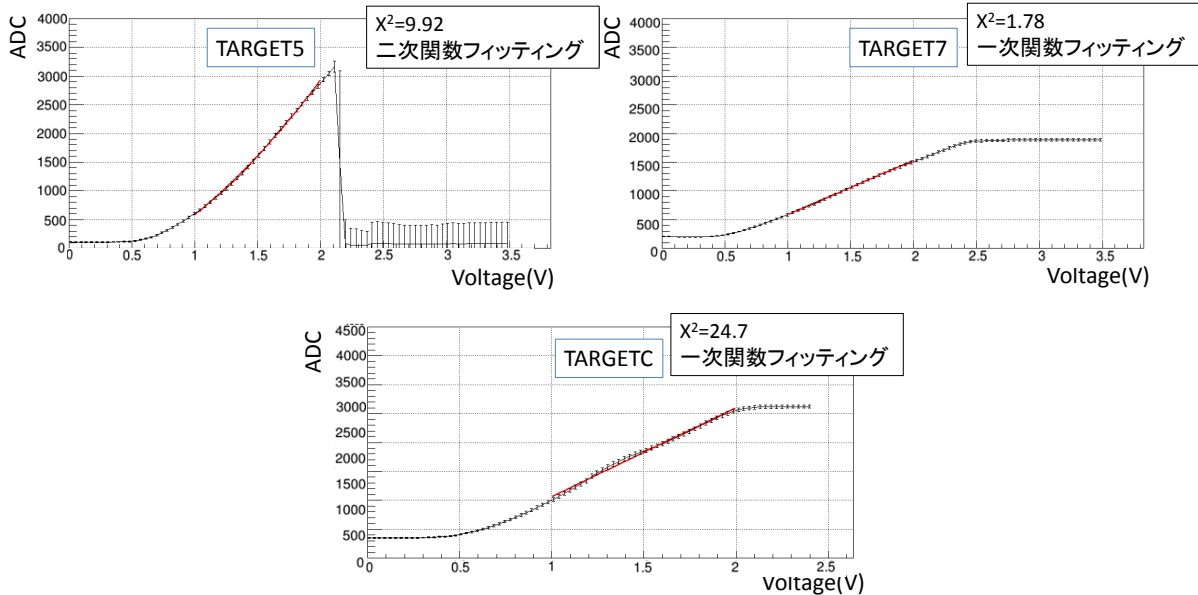


図 31: 各 TARGET の ADC 値と電圧値の関係

図 30 は、TARGET5、TARGET7、TARGETC における ADC 値と電圧値の関係の図である。なお TARGET5、TARGET7 では 0 から 512 番目までのストレージセルにおける ADC 値平均、TARGETC では 0 から 448 番目までのストレージセルにおける ADC 値平均と電圧値の関係をプロットしており、いずれも各 TARGET から読み出せる最大セル数である。

図 30 より、TARGET5 では ADC に対する電圧値の変化は直線性が悪く二次関数的であるが、TARGET7、TARGETC では TARGET ASIC のアップデートにより直線性が改善している [21]。そこで本実験では、TARGET5 の ADC と電圧値の変換式を二次関数フィッティングから、TARGET7 と TARGETC における変換式を一次関数フィッティングから導出した。なおフィッティングは、電圧値に対し ADC 値が一对一で決定する範囲で、ストレージセル毎に行った。

以降の TARGET の応答時間ばらつきの測定では、取得した ADC 値を電圧値変換したデータを使用する。

3.2.4 応答時間ばらつきの測定原理

本項では、TARGET のサンプリングセル毎応答時間ばらつきの測定原理について述べる。TARGET のセル毎応答時間ばらつきの測定方法は、アナログメモリ DRS4 の開発元である、PSI の Stefan Ritt 氏の方法を元に確立した [33][34]。なお DRS4 は CTA の大口径望遠鏡に使用される波形記録集積回路である。

応答時間ばらつきは、TARGET に周期的な波形を入力し、TARGET から出力した波形と周期を比較することで測定する。まず初期値として各セルの応答時間が理想的であると定義し、出力波形をプロットする。その後、プロットした波形を1周期毎に切り分け、それぞれの波形が入力波の周期に近づくように、プロットしたセル毎の時間幅を伸び縮みさせる。この伸び縮みさせた幅が、理想的な応答時間に対するばらつきになる。本測定では、出力波の電圧値が0Vを交差する点（以下、0交点とする）を用いて、入力波との周期を比較しているため、0交点のみで周期を決定できる波形であれば、原理的には応答時間ばらつきの測定が可能である。

さらに具体的な測定例を述べる。図32は、あるサイン波1周期を測定したセルにおける、応答時間ばらつきの測定原理の概略図である。 T_i はサンプリング時刻を表す。図32の場合、セル毎応答時間が理想的であれば出力波と入力波の周期が等しくなるはずだが、出力波の方が短くなっている。この場合、セル毎応答時間が理想より短くなっているとして、このサイン波1周期を測定したセルの時間幅を伸ばす。

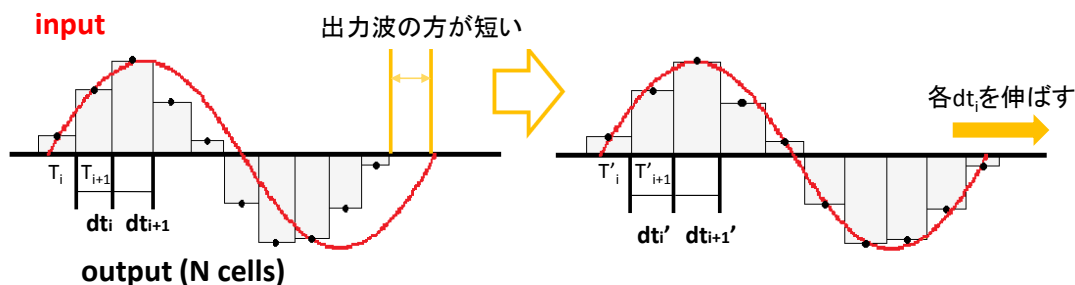


図 32: 応答時間ばらつきの測定原理の概略図 (分かりやすくするため、伸ばし幅を大きく表記)

図32では出力波が入力波の周期と一致するように時間幅を伸ばしているが、実際は damping factor という値をかけ、約1000分の1の値だけ伸び縮みさせている。応答時間ばらつき測定は、様々な位相のサイン波を入力し、1周期をサンプリングするセルの組み合わせを変えることで、各セルの時間幅を固有のばらつきを含む値に少しずつ収束させていく。1イベントあたりの変化値が大きいと、図33左図のように、応答時間測定結果が収束せず発散してしまう。これを防ぐために damping factor をかけている。なお図33は、100番目のストレージセルにおける応答時間ばらつき測定シミュレーションであり、赤線で示しているのが、ばらつきとして設定した値である。応答時間ばらつきアルゴリズムが期待通りに動作していれば、イベント積み重ね毎に測定結果が赤線に近づいていく。応答時間ばらつき測定シミュレーションの詳細は、3.6章にて述べる。

以下ではサイン波の測定を例として、本研究で確立したセル毎の応答時間ばらつきの測定の詳細について述べる。

入力波形の周期の決定

応答時間ばらつき測定を行うにあたり、まず、入力波の周期を決定する。先行研究より、応答時間ばらつき測定に使用する波形の周波数は、高周波の方が良いことが分かっている [34]。また、セル毎時間幅に対する入力波の周期が短すぎると、出力波の周期を定義できなくなるため、十分出力波の周期を定義できる入力周期を選択する必要がある [26]。本章の測定では、TARGET5、

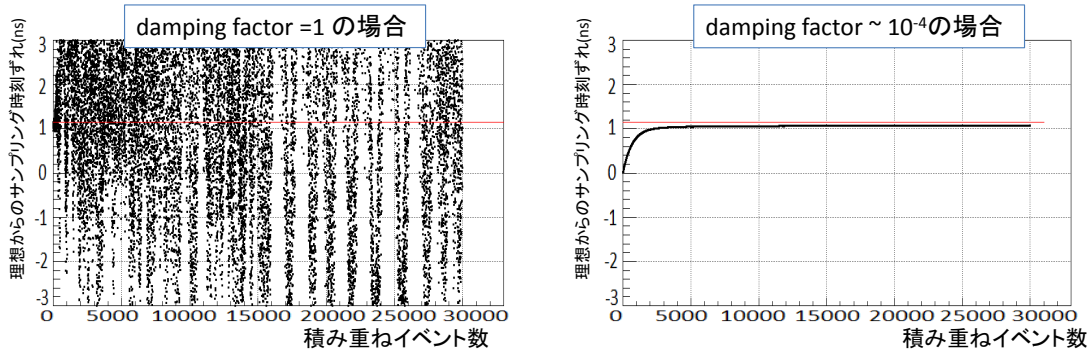


図 33: damping factor の大きさに対する、イベント積み重ねによる応答時間ばらつきの変化の様子

TARGET7 からの出力 1 イベントを 512 セル分のデータとし、TARGETC からの出力 1 イベントを 448 セル分のデータとして、50MHz のサイン波を用いて測定を行った。

出力波形の分割

上記で決定した波形をファンクションジェネレータから TARGET に入力し、出力した ADC 値の電圧値変換を行う。この時、電圧値データから V_{ped} 成分を差し引いておき、取得データの中心が電圧値 0 となるようにする。取得した波形データは、1 イベント毎に 1 周期ずつ、入力サイン波の周期と比較することで応答時間ばらつきを求めていく。そのためまずは、以下の手順に沿って取得した波形データを 1 周期毎に分割する。

1. 始めに、取得した波形の時間軸について定義する。以下では、 i 番目のセルのサンプリング時間幅を $dt[i]$ とする。また、0 番目のセルのサンプリング時刻を時刻 0 としたときの、 i 番目のセルのサンプリング時刻を $T_{cell}[i]$ とする。この時、

$$\begin{aligned} T_{cell}[0] &= 0 \\ dt[i] &= T_{cell}[i+1] - T_{cell}[i] \end{aligned} \quad (9)$$

である。以下では、この時間幅 $dt[i]$ を伸び縮みさせることで、応答時間ばらつきを求める。ここで $T_{cell}[i]$ には初期値が必要である。初期値は各セルの応答時間が理想的であるとして、 $T_{cell}[0] = 0$ 、 $T_{cell}[i] = (1/f_{sampling}) \times i$ とする。 $f_{sampling}$ は、サンプリングセルの切り替え周波数 (GHz) である。

2. 次に、取得した波形データを 1 周期毎に分割する。取得したデータは V_{ped} 成分を差し引いてあるため、電圧値 0 を中心に変化する。そこで、1 イベントに含まれる隣同士のセルの電圧値 $V[i]$ と $V[i+1]$ を比較し、 $V[i] < 0$ かつ $V[i+1] > 0$ となる場合を波形の立ち上がりとして、電圧値 0 をまたぐ直前のセルを抽出する。これにより図 34 のように、取得したサイン波を 1 周期毎に n 個に分割する。また、 n 周期に含まれない両端のデータを一度省く。この作業は、後に波形の立ち下がりについても行う。
3. 0 交点を求めるにあたり、取得データの電圧値の変化率が大きいほど、電圧値 0 と交わる角度が垂直に近づくため、0 交点の決定精度は良くなる [26]。手順 2 では電圧値が 0 となるラインが取得した周期波の振動中心になることを前提としているが、入力波形のオフセット電圧によっては、0 ラインが振動中心から外れることもあり得る。そこで上で定義した n 周期の

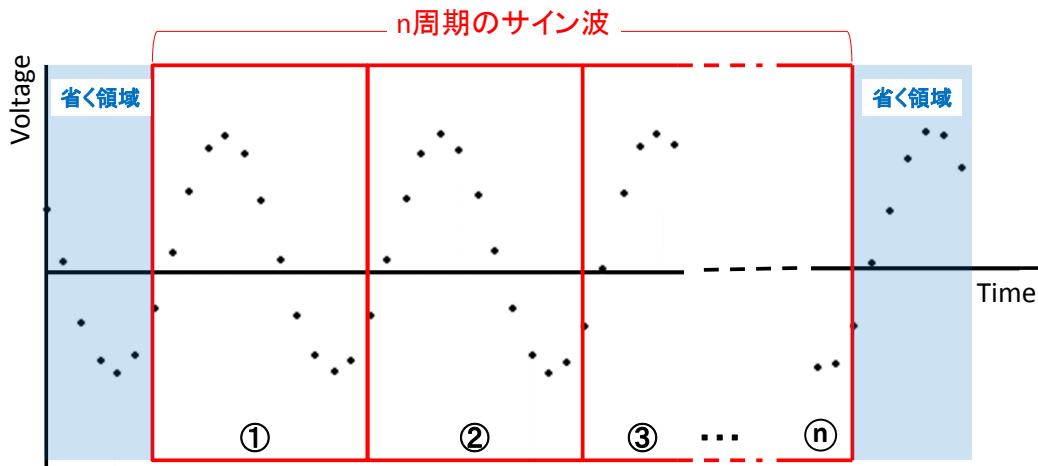


図 34: サイン波の周期分割の図

範囲の電圧値データの平均を算出し、これを新しく電圧値0となるラインとする。またデータの平均値が振動中心にならない場合は、ここで任意の0ラインを定義する。
 図 35 は、この作業を示す図である。電圧値0となるラインが変わることに伴い、0 交点直前のセルも変わるため、新たにセルを定義しなおす。以下、新しく定義した0 交点直前、直後のセルを用いて、セル毎応答時間のばらつきを求めていく。

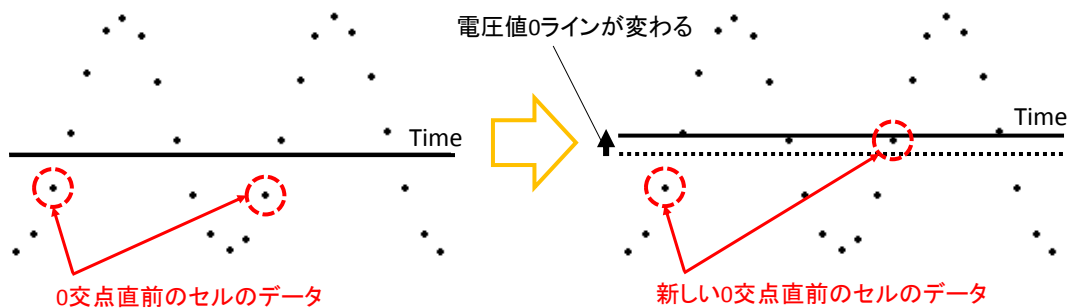


図 35: サイン波の振動中心の変更による0 交点直前のセルの再定義

0 交点の算出

TARGET から取得した波形データはデジタルデータであるため、時間軸に対し連続ではない。そのため、0 交点における実際の時刻を求める必要がある。そこで、上で求めた0 交点直前、直後のセルにおける電圧値プロットを直線をつなぎ、0 交点の時刻 t_a を求める。また、 t_a の次の0 交点時刻 t_b を求め、取得した波形の1周期を定義する。

- 図 36 は0 交点の定義を示す図である。まず、取得した波形データの1 番目の立ち上がり直前のセルを、 i_1 番目のセルとする。この時立ち上がり直後のセルは $i_1 + 1$ 番目のセルである。また、両セルにおける時刻はそれぞれ $T_{cell}[i_1]$ 、 $T_{cell}[i_1 + 1]$ であり、電圧値はそれぞ

れ $V[i_1]$ 、 $V[i_1 + 1]$ である。これらを踏まえて立ち上がり直前、直後のセルを直線でつなぎ、時間軸との交点 ta を求める。具体的には、それぞれの数値を以下の式に代入して求めた。

$$ta = Tcell[i_1] - \frac{V[i_1] \times (Tcell[i_1 + 1] - Tcell[i_1])}{V[i_1 + 1] - V[i_1]} \quad (10)$$

5. 同様に、 ta の次の 0 との交点 tb を求める。具体的には、 tb における立ち上がり直前のセルを i_2 番目のセル、立ち上がり直後のセルを $i_2 + 1$ 番目のセルとし、以下の計算式に対応する数値を代入して求めた。

$$tb = Tcell[i_2] - \frac{V[i_2] \times (Tcell[i_2 + 1] - Tcell[i_2])}{V[i_2 + 1] - V[i_2]} \quad (11)$$

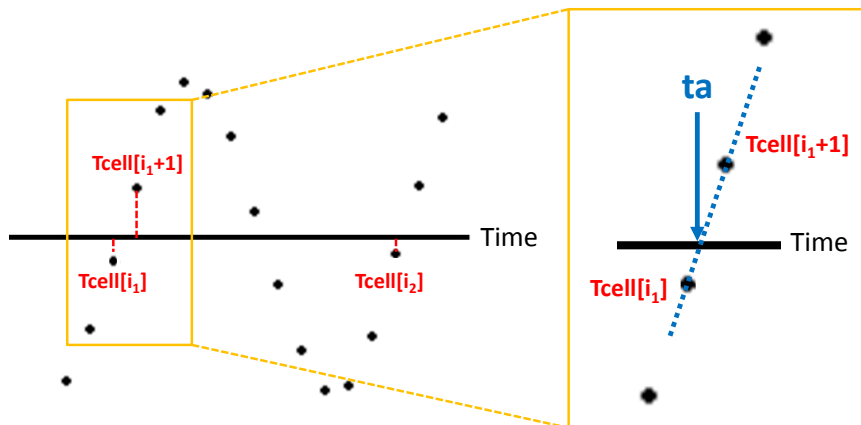


図 36: 波形データの 0 交点の定義

これにより、 ta から tb を 1 周期とする 1 番目の波形の周期が求められた。以降、 tb の次の交点…と、1 イベント内の全ての波における 0 交点を求め、それぞれの波における実際の周期を求める。

入力波と出力波の周期比較

ここからは、1 イベント内の各周期の波に着目して、1 番目の波から順番に応答時間ばらつき測定を行っていく。応答時間ばらつきの計測は、出力波が入力波の周期に近づくように、各セル時間幅 $dt[i]$ を伸び縮みさせる形で進んでいく。つまり、着目した波 1 周期が入力波の周期より短ければ、これを記録したセルは理想より長めの時間幅でサンプリングを行ったとして $dt[i]$ の幅を伸ばし、逆に着目した波が入力波の周期より長ければ、 $dt[i]$ の幅を縮めるという作業をする。

6. $Tcell$ についてプロットした出力波の 1 周期の長さ、入力波の周期 T_0 の差を求め、これを C とする。 C は、後に各セルの時間幅 $dt[i]$ を伸び縮みさせる幅となる値である。出力波 1 周期の長さは $tb - ta$ であるから、これより C を

$$C = T_0 - (tb - ta) \quad (12)$$

とする。

7. ここで、 C に damping factor(d) と呼ばれる定数をかけ 1000 分の 1 程度の値にし、これを新しく C' とする。

$$C' = C \times d \quad (13)$$

damping factor を導入する目的として、応答時間ばらつきの計算は、多数のイベントの積み重ねにより、 $T_{cell}[i]$ を徐々にばらつきを持つ値に近づけていく方法をとっており、変化率が大きいと値が発散してしまうためである。 d の値は測定に使用するイベント数を調節し、最も良い値を決めていく。

今回は d として、以下の値を用いた。

$$d = \frac{f_{sampling}}{10000} \times 20 \quad (14)$$

8. 上で求めた C を、着目した 1 周期の波を記録したセルの数で割り、各セルの時間幅に均等に分配することで、各セルの時間幅を伸び縮みさせる。着目した波に含まれるセル数 N_{cell} とすると、これは $N_{cell} = (i_2 - i_1) + 1$ で求められる。これより C' を新しく、

$$C'' = \frac{C'}{N_{cell}} \quad (15)$$

とする。

9. 上で定義した C'' を、着目した波に含まれる全セルの時間幅 $dt[i]$ に足していく。Stefan Ritt 氏の方法では、着目した波の外のセルに関して $C''^- = C'' / (512 - N_{cell})$ を定め、波外のセルに対し、 C'' を C''^- に置き換えて測定を行っていた。これは、DRS4 では終端のセルでばらつきが 0 になることを想定しているためである。TARGET では、終端セルのばらつきが 0 とは限らないため、 C''^- についての処理を行っていない。以上を踏まえ、 $T_{cell}[i]$ に対する、各セルの時間幅 $dt[i] + C$ に対応した各セルの時刻 $T_{cell}[i]'$ を以下のように定義し、これを新しく $T_{cell}[i]$ とする。なお、以下はデータ長が 512 セルの場合である。

$$\begin{aligned} T_{cell}[0]' &= 0 \\ T_{cell}[1]' &= T_{cell}[0]' + dt[0] + C'' \\ T_{cell}[2]' &= T_{cell}[1]' + dt[1] + C'' \\ &= T_{cell}[1]' + (T_{cell}[2] - T_{cell}[1]) + C'' \\ &\dots \\ T_{cell}[i]' &= (T_{cell}[i-1] - T_{cell}[i-2]) + dt[i-1] + C'' \\ T_{cell}[i+1]' &= (T_{cell}[i] - T_{cell}[i-1]) + dt[i] + C'' \\ &\dots \\ T_{cell}[511]' &= T_0 \times 512 - (dt[510] + C'') \end{aligned} \quad (16)$$

極端に短い出力波の処理

ここで、算出された $dt[i] = T_{cell}[i] - T_{cell}[i]$ が理想サンプリング時間幅の 10 分の 1 以下という、非常に短い値となった場合の処理をする。 $dt[i]$ が非常に短いと、2 番目、3 番目の周期の処理の際に、 C の値が非常に大きくなり、測定値が発散してしまう可能性がある。そこで、 $dt[i]$ が非常に短い時の $T_{cell}[i]$ の処理を、次の手順 10 のように行う。

- 手順 9 までに算出した $T_{cell}[i]$ について、 $dt[i]$ が理想サンプリング時間幅の 10 分の 1 になる $dt[i]$ を抽出する。これに当てはまる $dt[i]$ は、伸び縮み幅が大きすぎたとして、以下のようにして時間幅を調節する。まずは調節する時間幅として、理想サンプリング幅の 10 分の 1 の値と、算出した短い $dt[i]$ との差をとり、適当な係数をかけ、これを新たに C_{narrow} とする。 $dt[i]$ は理想サンプリング幅の 10 分の 1 よりも小さいため、 C_{narrow} は必ず正となる。

$$C_{narrow} = (T_0 \times 0.1 - dt[i]) \times 5 \quad (17)$$

求めた C_{narrow} を、 $dt[i]$ が非常に短い時の $T_{cell}[i + 1]$ に、以下のよう足していく。

$$T_{cell}[i + 1]' = (T_{cell}[i] - T_{cell}[i - 1]) + dt[i] + C_{narrow} \quad (18)$$

また、 $T_{cell}[i + 1]$ がデータ長の終端セルの場合は、以下のよう処理する。なお、以下はデータ長が 512 セルの場合である。

$$T_{cell}[511]' = T_0 \times 512 - (dt[510] + C) \quad (19)$$

これで、1 イベント目の 1 番目の波に対する応答時間のばらつき測定が終了した。

6. から 10. を 2 番目、3 番目の波に対しても順に行い、1 イベントに含まれる全ての波に対して応答時間ばらつきの測定を行っていく。この時、各セルにおける $T_{cell}[i]$ の値は 10. までに算出した $T_{cell}[i]$ の値を、2 番目、3 番目以降のサイン波に持ち越して使用する。以降、全イベントの応答時間ばらつき測定を行う間、 $T_{cell}[i]$ の値はその都度持ち越して使用する。
11. まで終了したら、今度は 2. において立ち下がりから始まる波について 1 イベント内の取得波形を分割し、以下 11. までを繰り返す。
- 1 イベントに対し立ち上がり、立ち下がりから始まる波それぞれについて測定が終了したら、1 イベント目の測定で得られた $T_{cell}[i]$ を 2 イベント目以降についても持ち越して、2. から 12. を繰り返す。
- 全イベントにおいて各セルの応答時間ばらつき測定が終了したら、出力された各 $T_{cell}[i]$ から $T_{cell}[i]$ の初期値をそれぞれ引き、理想サンプリング時刻に対する各セルのサンプリング時刻ずれを求める。また、隣り合うセルのサンプリング時刻ずれの差を求め、各セルの理想応答時間に対するばらつきを算出する。

以上により、各セルの応答時間ばらつきを測定した。

3.3 応答時間ばらつきの理論的な測定限界

本項では、応答時間ばらつきの理論的な測定精度について述べる。前項より、応答時間ばらつきの測定は、出力波の 0 交点を用いて行う。0 交点の決定精度は、データに混入するノイズや、波

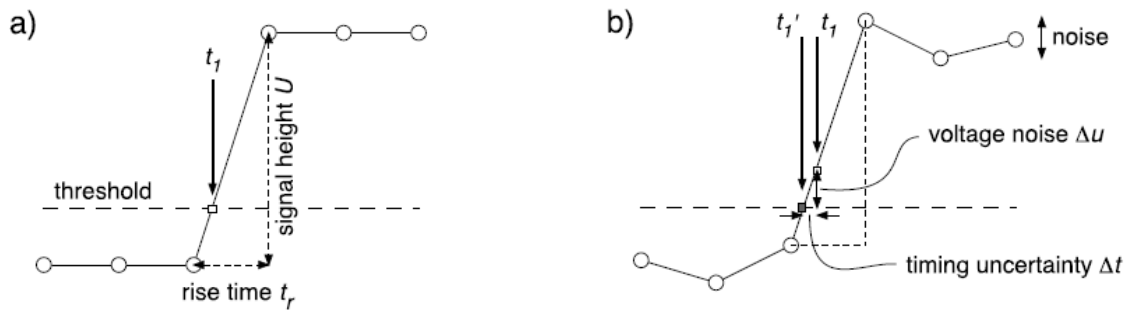


図 37: (a) 理想的な波形立ち上がり時の 0 交点 (b) 電圧ノイズを考えた場合の 0 交点 [26]

形の立ち上がりの早さの影響を受ける。先行研究では、応答時間ばらつきの測定限界 $\Delta t(\text{ns})$ の計算式を次のように定めている [26]。

図 37 は、方形波を例とした 0 交点の決定精度に関する図である。図 37(a) は、ノイズの混入がない、理想的な波形の立ち上がりの 0 交点を示している。 $t_1(\text{ns})$ は方形波の各データ点の時刻に対する 0 交点の時刻である。他方、図 37(b) は標準偏差 $\Delta u(\text{mV})$ の電圧ノイズを考えた場合の 0 交点を示している。電圧ノイズの混入により 0 交点の時刻は理想時刻から $t_1'(\text{ns})$ にずれる。これはノイズにより 0 交点の時刻にばらつき Δt が生まれるということであり、方形波の振幅 $U(\text{mV})$ と入力信号が U 立ち上がる時間 $t_r(\text{ns})$ を用いて、以下の関係が成り立つ。

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{U}{t_r} \quad (20)$$

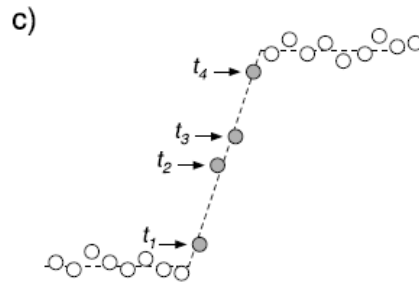


図 38: (c) サンプリング周波数が大きい場合の立ち上がりのデータ点 [26]

また、図 38 は、図 37 よりもサンプリング周波数が大きい場合のサンプリングの例を示している。サンプリング周波数が十分大きいと、方形波の立ち上がりの時間変化が n 個のデータ点によりプロットできる。すると n 個の点の直線近似により求められる 0 交点のばらつきは、図 37 に対し、 n が大きいほどノイズの効果になまされる。また、 n はサンプリング周波数 $f_s(\text{GHz})$ と方形波の立ち上がり時間 t_r について $n = f_s \times t_r$ と書けるため、 Δt について以下が成り立つ。

$$\Delta t = \frac{\Delta u}{U} \times t_r \times \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{\Delta u}{U} \times \frac{\sqrt{t_r}}{\sqrt{f_s}} \quad (21)$$

今回の測定で使用した TARGET のノイズの標準偏差は、本測定の波形サンプリングで使用した、Vped(DAC) が 2000 の場合の標準偏差から求めた。具体的には、TARGET5, TARGET7 では 1 イ

イベントあたり 512 セル、TARGETC では 1 イベントあたり 448 セルで 1000 イベント分の DC データを測定し、全セルの電圧値の標準偏差を求めた。その結果、TARGET5 で 1.55mV、TARGET7 で 3.42mV、TARGETC で 3.94mV であった。

またサンプリング速度は、TARGET5 は 0.4GHz、TARGET7 と TARGETC は 1.0GHz でサンプリングを行った。TARGET5 で 0.4GHz サンプリングを行ったのは、本測定で使用した TARGET5 の 1.0GHz サンプリングでは、64 個のサンプリングセルのうち後半 32 セルが正常に動作せず、でたらめな値を出力してしまうためである。原因は FPGA の設定の問題と考えられ、これは今後調節していく必要がある。

さらに本測定では入力波に 50MHz、500mVpp のサイン波を用いて、応答時間ばらつきを測定した。この周波数は本測定で使用したファンクションジェネレータの出力できる最大の周波数である。また振幅は、取得データの最大値が TARGET のダイナミックレンジより 200mV 以上小さい値を設定し、ノイズ等の混入を含めても取得データが飽和しない値を設定した。この振幅では、サイン波の振動中心が 0 交点と一致するとき、0 交点 \pm 0.5ns の範囲 ($t_r = 1$) での電圧値変化 U (mV) は 78.2mV になる。

これらの値を上式に代入すると、各 TARGET の応答時間ばらつきの測定限界 Δt (ns) は以下のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta t_{T5} &= 0.0313 \\ \Delta t_{T7} &= 0.0437 \\ \Delta t_{TC} &= 0.0504\end{aligned}\tag{22}$$

3.4 TARGET5 の応答時間ばらつき測定結果

ここでは、TARGET5 について、初期に試験的に行った応答時間ばらつき測定結果について述べる。図 39 は、周波数 50MHz、振幅 500mVpp のサイン波を入力し、データ長のうち 100 番目のセルが収束した時点で全セルの測定結果を出したものである。100 番目のセルの収束に着目した理由は、サンプリングセルの周期である 64 の倍数セル付近では隣り合うセルの理想時刻に対するずれの差が大きく、隣り合うセル同士の影響が大きいと考えられるためである。また、この測定アルゴリズムはデータ長の両端の値の影響を受けやすいため、64 セル周期で変化する測定結果に対し、1 周期目を避け、2 周期目で収束の観察を行った。なお、収束の判断はここでは試験的に目視で行い、30000 イベント測定時点で測定を止めた。

図 39 左より、試験的な結果の特徴として、TARGET5 の応答時間ばらつきは 64 セル毎の周期性が見られている。これは 64 個のサンプリングセルを使いまわしている TARGET5 のサンプリング構造により説明できる結果と言える。また、図 39 右より、30000 イベントの積み重ねによる 100 番目のセルのサンプリング時刻ずれは 1.2ns 付近に収束していると言える。したがって、試験的な結果としては、応答時間ばらつきの測定は期待通りの結果が得られたと言える。

ここで、試験的な測定は目視により応答時間ばらつき測定結果の収束を判断した。しかし、図 39 右より、イベント数 5000 から 30000 イベントにかけて、理想からのサンプリング時刻ずれはほぼ一定の値をとっている。そのため、応答時間ばらつきが、少なくとも本来の目的であるサブナノ秒の精度で測定できると言える時点のイベント数を見積もることが必要である。また、応答時間ばらつき測定のパラメータである damping factor についても、様々な値に対する挙動を調べる必要がある。

他方、図 39 左の特徴として、64 セル毎に右肩上がりとなるのこぎり波型の形状が見られる。これは、TARGET のサンプリング周波数が理想からずれていることが原因と考えられる。例えば、

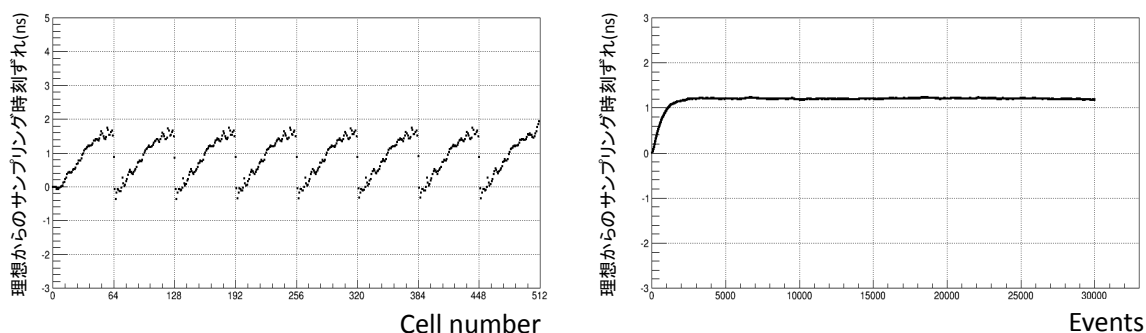


図 39: TARGE5 初期の応答時間ばらつき測定結果（左）100 番目のセルのイベント積み重ねに対する収束の様子（右）

本測定で TARGET5 は理想的に 0.4GHz でサンプリングを行っていることを前提としている。これに対し TARGET5 が、理想よりずれた周波数でサンプリングをしていた場合、サンプリングセル固有の応答時間ばらつきに加え、サンプリング周波数のずれの分も測定結果に加算される。図 39 左では、0.4GHz に対し遅い周波数でサンプリングしているために、理想サンプリング時刻よりも実際のサンプリング時刻が遅くなり、右肩上がりの形状を示している可能性がある。したがって、セル固有の応答時間ばらつきを求めるためには、サンプリング速度を理想的な値に調節することが必要である。

これらを踏まえて次の 3.6 章では、応答時間ばらつき測定に最適なイベント数、damping factor の値についてシミュレーションにより最適な測定精度を見積もる。また得られた結果をもとに、3.7 章ではサンプリング速度調節を行った上での再測定の結果を述べる。

3.5 シミュレーションによる最適イベント数と damping factor の選定

本論文における応答時間ばらつき測定アルゴリズムは、次の 3.6.1 章末で述べるように、ある程度イベント数を重ねると damping factor に関わらず、発散してしまう特徴がある。したがって本測定で使用した応答時間ばらつき測定アルゴリズムでは、最適なイベント数と damping factor を決定することが必要である。本項では適当な応答時間ばらつきを持つサイン波を疑似的に生成し、この疑似サイン波を用いて応答時間ばらつき測定シミュレーションを行った結果について述べる。ここでの疑似サイン波は、初期の TARGET5 の応答時間ばらつき測定時に得られた、のこぎり波形の時刻ずれ持つサイン波である。ここでの時刻ずれとは、3.3.4 章においてイベント積み重ねにより導出した $T_{cell}[i]$ から、理想的な $T_{cell}[i]$ を引いたものである。今回設定したのこぎり波形の時刻ずれは、以下の図 40 に示すものとする。

以下では、(1)damping factor を固定した場合の、イベント数に対する応答時間ばらつき測定精度 (2)damping factor に対する応答時間ばらつき測定精度、について述べる。

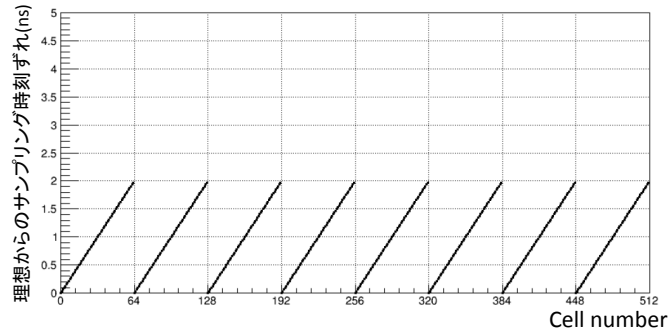


図 40: のこぎり波形の疑似時刻ずれ

3.5.1 damping factor を固定した場合の、イベント数に対する応答時間ばらつき測定精度

ここでは、3.3.4 章における damping factor を以下のように定義する。

$$d = \frac{f_{sampling}}{10000} \times A \quad (23)$$

ここでは $A = 20$ とし、イベント数に対する応答時間ばらつきの測定精度を見積もった。

図 41 は、イベント数に対する応答時間ばらつきの測定結果である。この結果から、100 万イベントによる測定を除けば、測定結果はのこぎり波の形に沿った値をとっている。出力した値は1万イベントからイベントを増やしていくと、徐々に元となる値に近づいていくが、イベント数が多くなると、逆に元となる値から離れていくという結果が得られた。

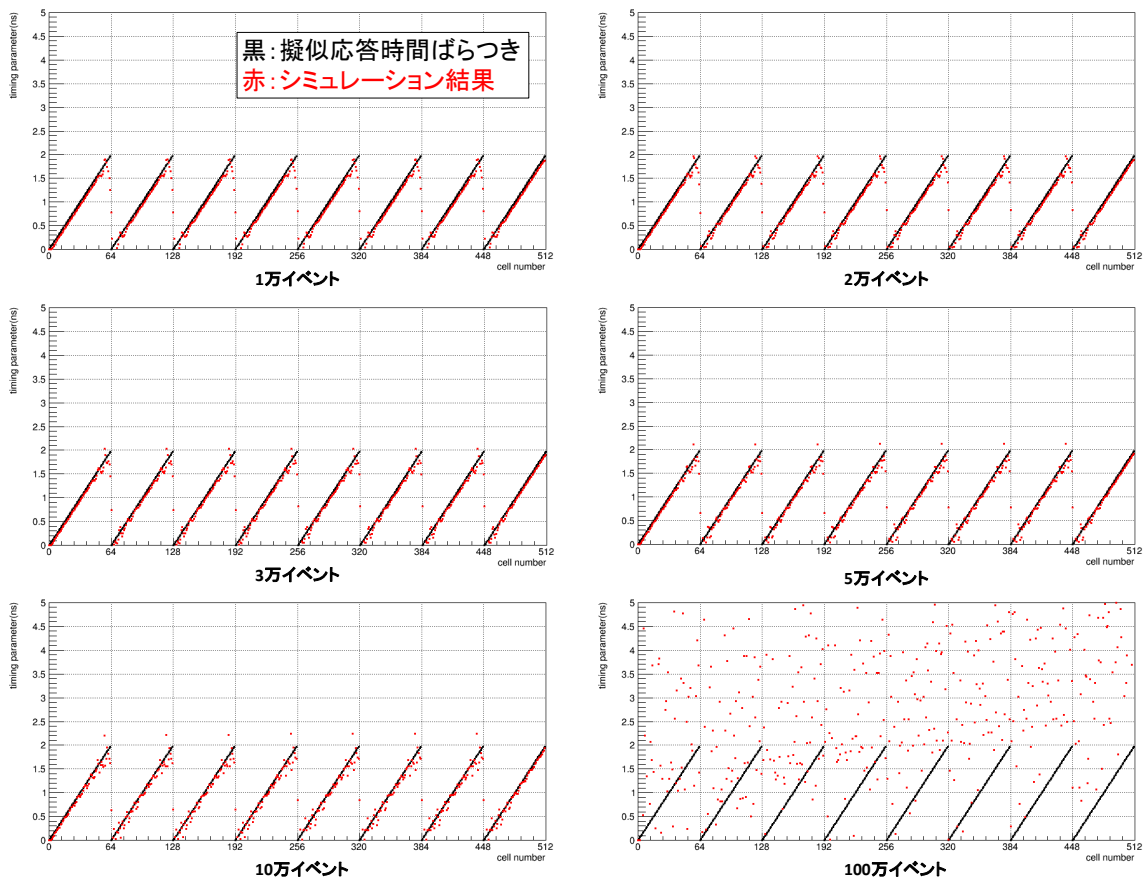


図 41: イベント数に対する応答時間ばらつき測定の結果

図 42 は、各イベント数に対する応答時間のばらつきの測定精度を、図 41 の疑似的な応答時間ばらつきとシミュレーション結果の差のヒストグラムから算出したものである。この図より、3 万イベントの測定において標準偏差が最小となり、 $A = 20$ において 0.13ns の精度で応答時間ばらつきが測定できるという結果が得られた。

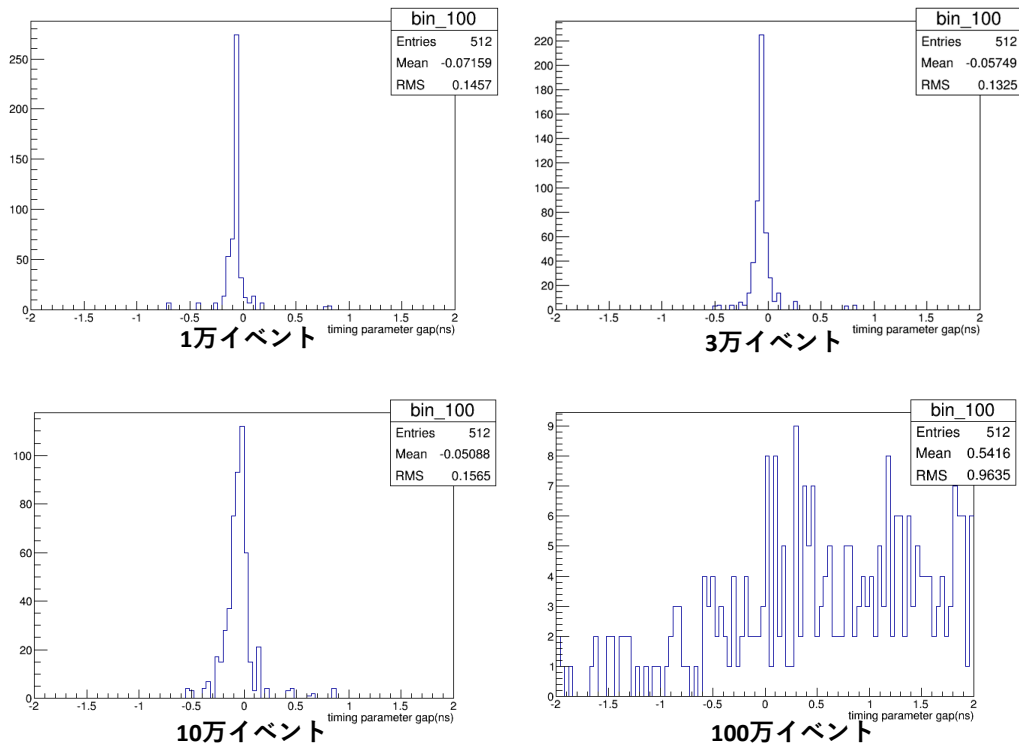


図 42: イベント数に対する応答時間ばらつきの測定精度

また、図 43 は、100 万イベント測定時の、100 番目のセルにおける測定値の変化の様子である。100 番目のセルを選んだ理由は、応答時間ばらつき測定において初期値に引っ張られやすい両端のセルから離れており、また 64 セルの周期の境界から離れているためである。赤線は期待される収束値を示す。

図 43 から、応答時間ばらつきの測定値は、イベントを増やしていくと徐々に期待される値に近づいていくものの、20 万イベントを超えると期待される値から離れ、以降大きく波打つように変化していることが分かる。これについての原因は現在考察中であるが、測定アルゴリズムにおいて、あるセルの応答時間ばらつきが極端に大きく測定された時、他のセルがこの値との整合をとるために極端な値を取り、これが繰り返されたということが考えられる。

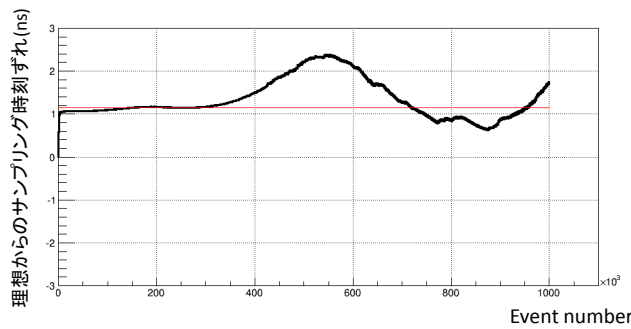


図 43: 100 万イベント測定時の 100 番目のセルにおける値の変化の様子

3.5.2 イベント数を固定した場合の、damping factor に対する応答時間ばらつき測定精度

ここではまず、damping factor の特徴について述べる。以下の図 44 は、damping factor における A を、 $A = 10, 20, \dots, 100$ について 100 万イベントサイン波による応答時間測定を行った時の、100 番目のセルの変化の様子を示した結果である。ただし各 A におけるプロットは $A = 20$ を基準とし、横軸を $(A/20) \times eventnumber$ と定めて行った。

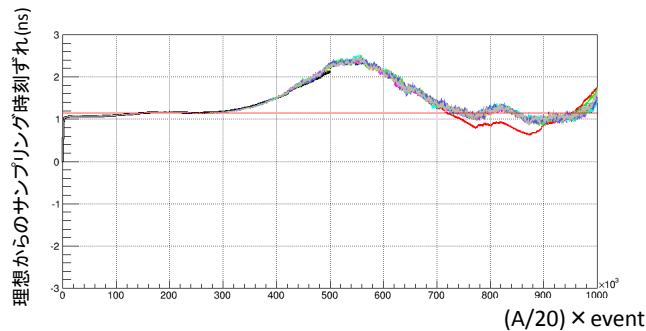


図 44: damping factor 毎の 100 万イベント測定時の 100 番目のセルにおける変化の様子

この図より、 A が 2 倍になると、変化の速さも 2 倍になる傾向があることが分かる。したがって damping factor は、応答時間ばらつきの測定の早さを調節する値であると言える。ただし damping factor が大きいほど、1 イベントを積み重ねるあたりの時間幅の伸び縮み大きさが大きくなるため、収束過程での値のばらつきは大きくなる。そこで、本結果をもとに、応答時間測定精度が最も良くなりかつ、測定時間の短縮ができるイベント数と A の組み合わせについての測定を行った。

まず、前項で得られた $A = 20$ ではイベント数が 3 万の時に応答時間測定精度が最も良くなることから、 $A \times eventnumber = 600000$ となる A とイベント数の組み合わせが、各 A において最も精度が良くなるとして、用いるイベント数を決める。また、このイベント数付近の時点における応答時間測定精度を算出し、測定精度の安定性を見積もる。ここでは $eventnumber \pm (1/5) \times eventnumber$ の範囲において、測定精度の安定性を算出した。

図 45 は、damping factor とイベント数組み合わせの違いによる応答時間ばらつきの測定精度の図である。各プロットは、横軸の A と対応するイベント数で応答時間測定を行った時の、応答時間測定精度である。また、各エラーバーは、各 A に対応するイベント数付近の時点における応答時間測定精度のばらつきを示す。

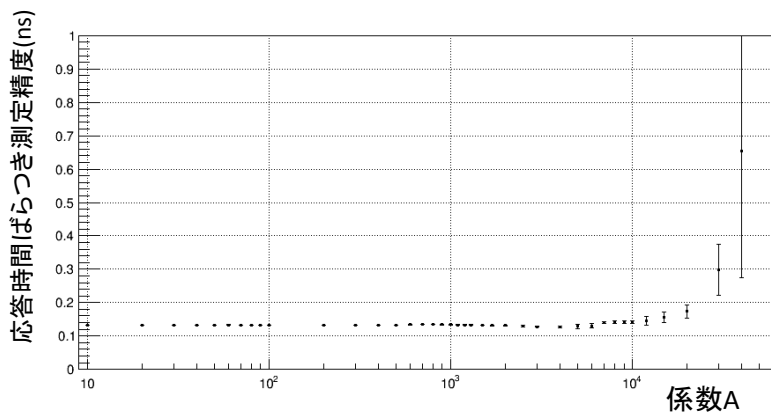


図 45: damping factor とイベント数組み合わせの違いによる応答時間ばらつきの測定精度

この図より、 $A < 10000$ においては測定精度が 0.15ns 以下かつ、測定精度の安定性が 0.01ns 以下で、応答時間測定を行うことが可能であるという結果が得られた。したがって、この条件では、 0.15ns 以下の精度で安定した応答時間ばらつきの測定が可能であると言える。さらにこの精度は、応答時間ばらつきを補正した取得データの時間情報を用いて、時間情報解析に十分役立てられることが期待できる。

ただし、応答時間測定アルゴリズムには、イベント数に対し計算結果が発散してしまうという問題など、まだ改善の余地がある。そのため、以下の測定では $A = 20$ 、イベント数 3 万の組み合わせで応答時間ばらつき測定を行った。

3.6 TARGET の応答時間ばらつき測定結果

2.7 章で述べたように、TARGET は 64 個のサンプリングセルを使い回して、波形データのサンプリングを行っている [21]。そのため TARGET の応答時間測定結果は、64 セルの周期性を持つことが期待される。

ここでは、TARGET5、TARGET7 および TARGETC について、セル毎応答時間ばらつき測定を行い、いずれにおいても十分測定できているかについて評価した。測定には振幅 500mVpp の 50MHz サイン波 30000 イベントを用いた。また、応答時間ばらつき測定スクリプトにおける damping factor は、前項における $A = 20$ として測定した。読み出したデータの長さは 64 セル周期性を確認するため、TARGET5、TARGET7 で 512 セル、TARGETC で 448 セルとし、各 TARGET で読み出せる最長のデータ長さを設定した。TARGET の入力チャンネルには、TARGET5 ではチャンネル 0、TARGET7 ではチャンネル 6、TARGETC ではチャンネル 0 を用いた。

図 46 は、各 TARGET におけるサンプリング時刻ずれの測定結果である。いずれも 64 セル周期の形が見えており、期待できる結果が得られている。特に TARGET7、TARGETC は 1GHz サンプリングを行ったサイン波を使用した結果であるが、どちらもサンプリング時刻ずれは 1ns 未満であり、各セルのデータが飛ぶことなく記録されていることが期待できる。

ただし、TARGET のもともとの応答時間ばらつきの値は不明であるため、測定結果との比較はできない。そこで次章では、応答時間ばらつきの大きさに対する測定精度を見積もる。また本測定結果よりもばらつきを持つイベントについて測定精度を算出し、TARGET の応答時間ばらつき測定精度の期待できる値を見積もる。

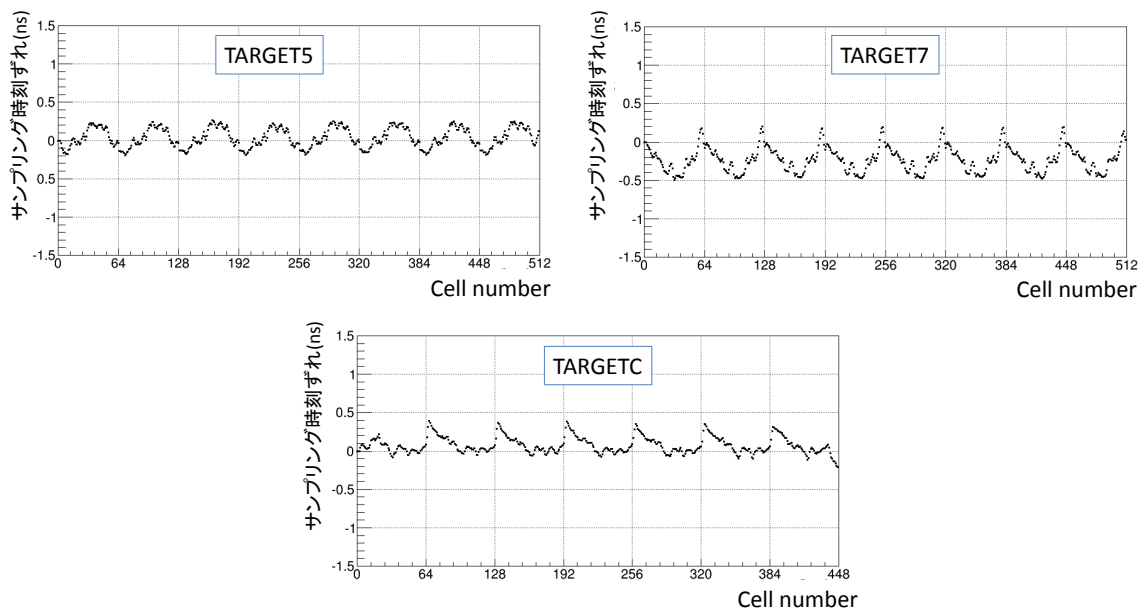


図 46: 各 TARGET のサンプリング時刻ずれ測定結果

3.7 TARGET の測定結果を踏まえたシミュレーションによる応答時間ばらつきの測定精度

本章では、3.7 章で得られた TARGET の応答時間ばらつき測定結果をもとに、更に詳細な測定精度を見積もる。まず、先に述べたように、TARGET の応答時間ばらつきには、TARGET のサンプリング速度のずれの寄与も含まれる。そこで、どの程度サンプリング速度を理想に合わせられれば、サブナノ秒の精度で応答時間ばらつきが測定できるかについて見積もる。また、TARGET のもともとの応答時間ばらつきの値が不明であることから、3.7 章の測定結果よりも大きいばらつきを持つ場合について測定シミュレーションを行い、TARGET の応答時間ばらつき測定精度の期待できる値を見積もる。

3.7.1 理想的なサンプリング速度からのずれの大きさに対する測定精度

TARGET ボードに搭載された FPGA は、64 個のセルが理想的な時間幅の長さだけサンプリングを終えたら、再び 1 番目のセルにサンプリングトリガーをかける。つまり 1.0GHz で連続サンプリングを行う場合、サンプリングトリガーは 64ns 毎に FPGA から出力される [23]。しかし、2.8 章で述べた TARGET のサンプリング速度を調節する V_{adjP} 、 V_{adjN} 初期値のずれや、サンプリングセルの応答時間ばらつきにより、64 個のセルは理想的な時間幅でサンプリングを行うとは限らない。このような場合の応答時間ばらつきは、64 の倍数セルでサンプリング速度が理想的な時間に戻されるため、図 41 のように、63 セル目から 64 セル目にかけて大きく変化する。

本論文における応答時間ばらつきの測定は、TARGET のサンプリングセルの理想的な応答時間からのずれを測定している。そのため、サンプリング速度のずれによる応答時間のずれも、測定結果に含まれてしまう。サンプリングセル固有の応答時間ばらつきを測定するためには、サンプリング速度を理想的な値に近づける必要がある。また、図 41 のように、隣り合うセルのサンプリ

ング時刻ずれの差が大きい場合、測定精度は悪くなる。したがって、サンプリング速度がをできるだけ理想的な値に近づけることは重要である。

そこで本測定では、サンプリング速度が理想的な値からずれている場合に、セル固有の応答時間ばらつきがどの程度の精度で測定できるかを、シミュレーションにより確認した。なお、この測定では 3.7 章で測定した TARGET の応答時間ばらつき測定結果をもとに、図 47 のような、理想的なサンプリング時刻に対し $\pm 0.5\text{ns}$ の幅で変化するずれを疑似的に設定し、シミュレーションを行った。各サンプリングセルの理想的なサンプリング時間幅に対するずれは 0.15ns の幅で変化する値を用いた。

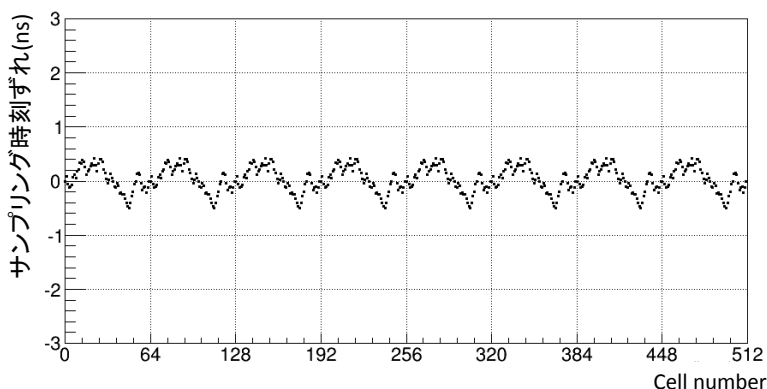


図 47: 1.0GHz サンプリングにおける疑似時刻ずれ

以下の図 48 は、図 47 の時刻ずれを持つサンプリングセルについて、さらにサンプリング速度のずれがある場合の、応答時間ばらつき測定の結果である。本測定では、理想サンプリング時刻を 1.0GHz とし、入力波のサンプリング速度を 0.97GHz から 1.03GHz まで変化させ、応答時間ばらつき測定のシミュレーションを行った。また、図 48 の左におけるサンプリング時刻ずれが ± 0.5 の赤線は、理想的なサンプリング速度におけるサンプリング時刻ずれの最大値、最小値の幅の目安である。

図 48 より、サンプリング速度が理想よりずれていると、応答時間ばらつきの測定精度が悪くなっていることが分かる。また図 49 は、理想サンプリング速度 1.0GHz に対しサンプリング速度が 0.97GHz から 1.03GHz までずれた場合の、応答時間ばらつき測定精度の図である。データ点は図 48 におけるヒストグラムの、理想時刻に対するサンプリング時刻ずれの平均値、エラーバーはヒストグラムの標準偏差であり、これが応答時間ばらつき測定精度に当たる。応答時間ばらつき測定精度は、サンプリング速度のずれが小さいほど良くなることが分かる。したがって、応答時間ばらつき測定を行う場合は、サンプリング速度をできるだけ理想の値に近づける必要があると言える。

本測定における実際の TARGET の応答時間ばらつき測定では、あらかじめ 50MHz サイン波 (周期 20ns) 500 イベントをサンプリングし、平均周期を測定することで、サンプリング速度を調節した。具体的には 2.8 章で述べた VadjN を調節し、平均周期が 20ns になった時点で調節を終了し、応答時間ばらつき測定を行った。

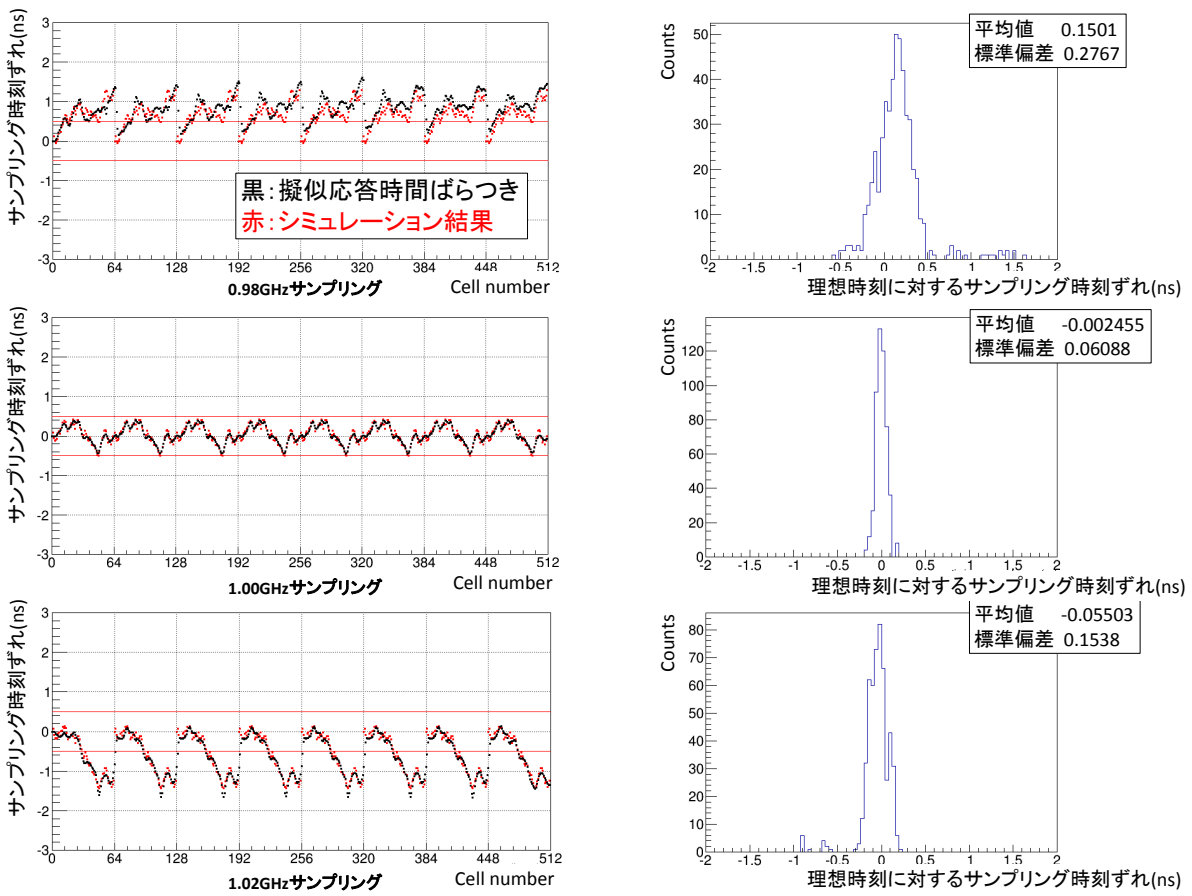


図 48: サンプリング速度ずれがある場合の応答時間ばらつき測定結果

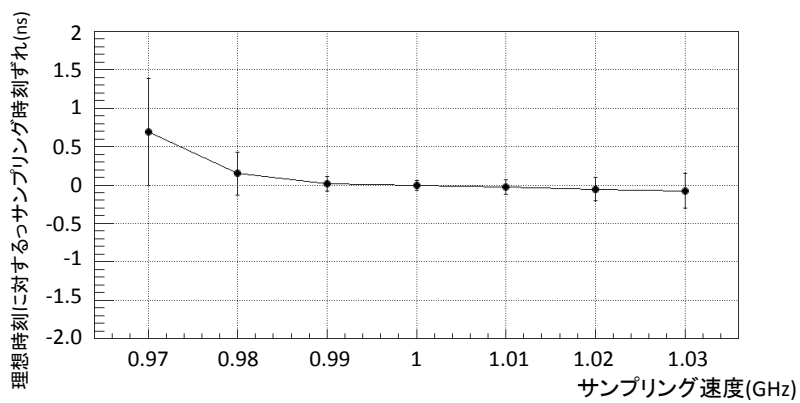


図 49: サンプリング速度ずれがある場合の応答時間ばらつき測定精度

3.7.2 応答時間ばらつきの大きさに対する測定精度

応答時間ばらつき測定精度は、隣り合うセルのサンプリング時刻ずれの差が大きいと悪くなる。したがってここでは、セル固有の応答時間ばらつきが大きい場合の測定精度を、シミュレーションにより確認した。本測定では、図 47 の応答時間ばらつきを元に、各セルの理想サンプリング時間幅に対するずれを 1/3 倍から 8/3 倍に設定し、応答時間ばらつき測定シミュレーションを行った。

以下の図 50 は、理想サンプリング時間幅のずれ大きさに対する応答時間ばらつき測定シミュレーションの結果である。

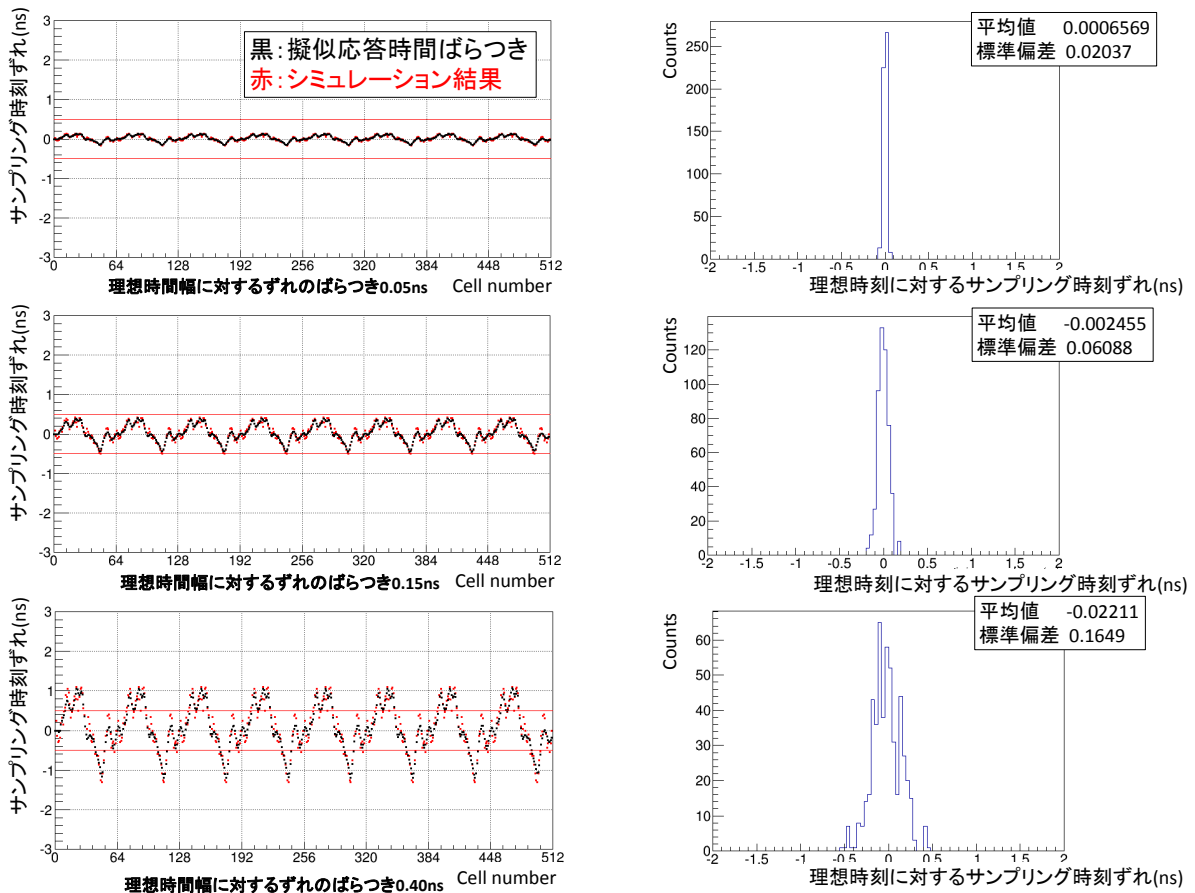


図 50: 理想サンプリング時間幅に対するずれの大きさと応答時間ばらつき測定結果

図 50 より、理想サンプリング時間幅に対するずれが大きいくほど、応答時間ばらつきの測定精度が下がることが分かる。また、以下の図 51 は、理想サンプリング時間幅に対するズレを 1/3 倍から 8/3 倍まで設定した時の応答時間ばらつき測定精度の図である。見方は図 49 と同じく、データ点は図 50 におけるヒストグラムの、理想時刻に対するサンプリング時刻ずれの平均値、エラーバーはヒストグラムの標準偏差である。応答時間ばらつき測定精度は、サンプリング時間幅に対するずれが大きいくほど悪くなる。なお、3.7 章で求めた TARGET の応答時間ばらつきはいずれも $\pm 0.5\text{ns}$ 以内に収まっている。

ここで 1.0GHz サンプリングを行う TARGET7 でのサンプリングを考える。TARGET7 の理想サンプリング時間幅からのずれは 0.15ns の幅で変化する。TARGET の応答時間ばらつき測定精度は、TARGET の本来の応答時間ばらつき値が不明であるため、正確な値は出すことができない。

い。そこで、TARGET7における0.15nsより悪い、0.3nsの幅で変化する場合を考える。この場合、応答時間ばらつきの測定精度は0.133nsである。TARGET7の応答時間ばらつき測定精度は、少なくとも0.133nsより小さいと期待できる。

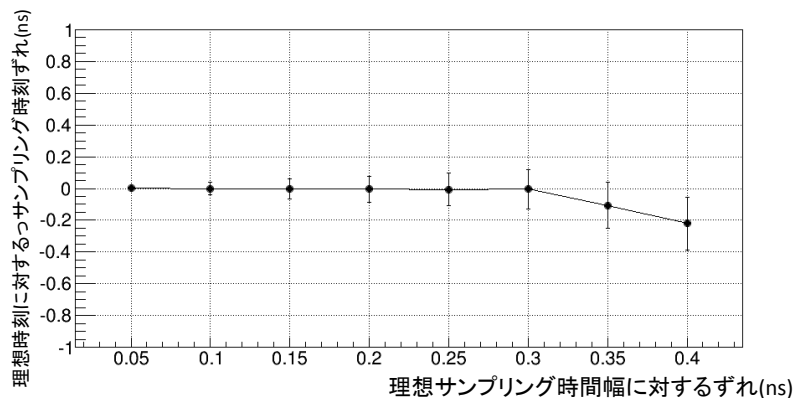


図 51: 理想サンプリング時間幅に対するずれの大きさによる応答時間ばらつき測定精度

3.8 電荷分解能の評価

3.8.1 応答時間ばらつきの補正による電荷分解能の評価

TARGET7について、前項で求めた各セルの応答時間ばらつきを補正することで、TARGETの電荷分解能がどの程度向上するかについて評価した。以下の図 52 は、電荷分解能の評価方法についての図である。

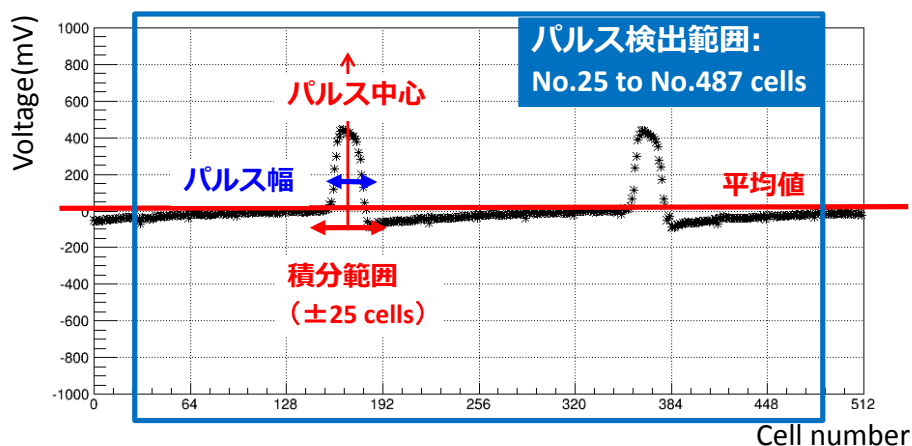


図 52: 測定電荷量の定義

本測定では幅 20ns のパルス波を 5MHz の周波数で入力し、取得したパルス波の時間積分値を測定電荷量とした。また、パルス波の入力タイミングを変え、様々なセルについて電荷量を算出す

ることにより、電荷分解能を算出した。測定電荷量 $Charge$ は、以下の式で表す。

$$Charge = \sum dt_i \times V_i \quad (24)$$

dt_i は i 番目のセルのサンプリング時間幅、 V_i は i 番目のセルにおける電圧値である。

本測定では、1 イベントに含まれるセルの電圧値の平均値をまたぐセルをパルスの立ち上がり及び立ち下がりとし、両セルの中間点をパルスの中心とした。また、電荷量はパルス中心から ± 25 セルの範囲で電圧値を積分して求めた。なお 1 イベントに含まれるセルのうち、両端から 25 セルの範囲においては、パルスが途切れているものとしてパルスの定義を行わない。

図 53 は、TARGET のセル毎応答時間ばらつき補正前後における、電荷分解能の図である。電荷分解能は、測定電荷の分布の標準偏差を、平均値で割った値として定めている。また、64 の倍数セルが積分範囲に含まれるかどうかの言及については、TARGET のサンプリングの特徴が関係する。TARGET では 64 セル毎にサンプリングのトリガーがかかり、64 個のセルが動き出すことでサンプリングを行っている。そのため、64 セル毎のサンプリングタイミングと、64 個のセルが切り替わる速度がかみ合わないと、64 セル毎に測定データが歪んでしまう。本測定ではあらかじめサイン波を測定し、サイン波のフィッティングによりサンプリングタイミングの調節を行っている。

図 53 では、応答時間ばらつき補正後に、電荷分解能が 0.59 ポイント向上していることが分かる。また、サンプリング速度調節が不十分であったために広がっていた部分も、応答時間ばらつき補正により改善している。これは、サンプリング速度がずれている部分も応答時間ばらつきとして計算され、補正がかかったためと考えられる。

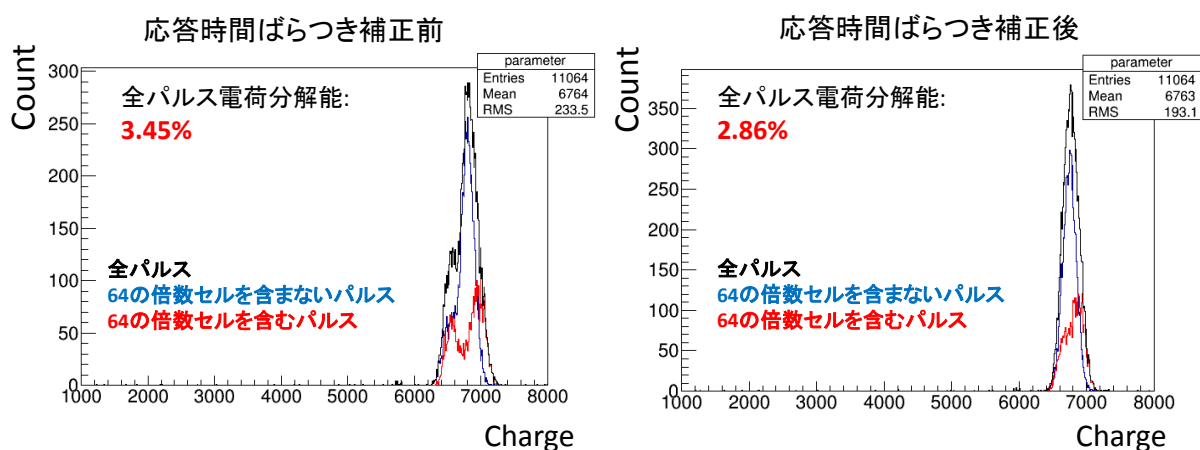


図 53: 電荷分解能の測定結果 (左:応答時間ばらつき補正前 右:補正後)

3.8.2 スパイクノイズの除去による電荷分解能の評価

TARGET の測定では、図 54 のように、ランダムなスパイクノイズが混入することがある。スパイクノイズは電荷分解能の測定でパルスとして検出されるため、電荷分解能の低下につながる。そのため、スパイクノイズを除去することは重要である。

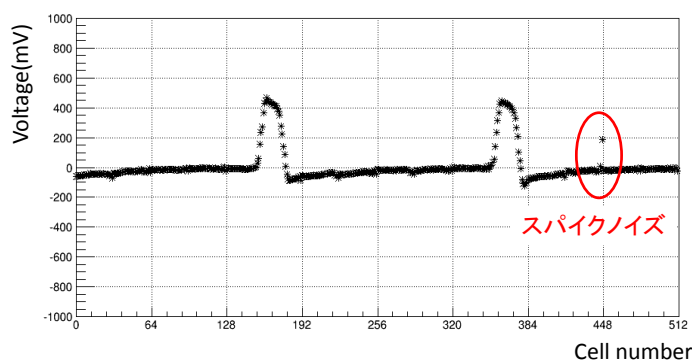


図 54: TARGET7 におけるスパイクノイズ混入の例

スパイクノイズの特徴として、図 55 のように、64 の倍数セルにおいて出現するという点が挙げられる。また、図 55 は Vped(DAC) を 2000 に設定した状態で、DC イベントを 5 万イベント測定し、100mV 以上の立ち上がりがあったときにこれをスパイクノイズとして検出したものである。スパイクノイズは 730 イベントであり、測定イベント数に対し約 1.5% の割合でスパイクノイズは混入すると言える。

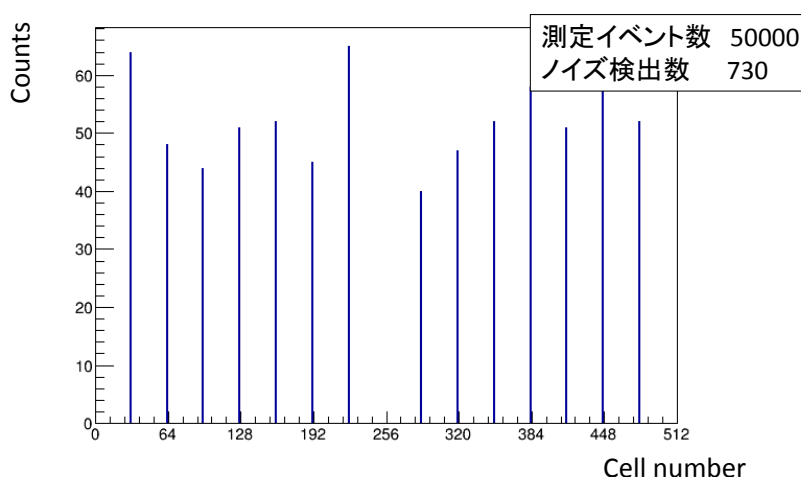


図 55: TARGET7 におけるスパイクノイズの検出セル

さらに図 56 は、TARGET7 のサンプリングチャンネル 0 でノイズを検出した時、同じタイミングでノイズを検出した別チャンネルの数を表した図である。ここではチャンネル 0 で検出した 248 個のスパイクノイズについて、同時にノイズが出現したチャンネル数を測定した。なお、この図は 0 チャンネルも含んでチャンネル数を数えている。図 56 より、あるチャンネルでスパイクノイズが発生すると、別のチャンネルでも同時にスパイクノイズが発生していることが分かる。

また、図 57 は、チャンネル 1 に対するチャンネル 6 のスパイクノイズの波高の比である。チャンネル 1 に対するチャンネル 6 のスパイクノイズの波高は 1.11 倍であり、チャンネルとスパイクノイズの高さに相関があることが分かる。したがって、あるチャンネルをスパイクノイズのモニタリングに用いることで、別のチャンネルで発生したスパイクノイズを除去することが可能であると考えられる。

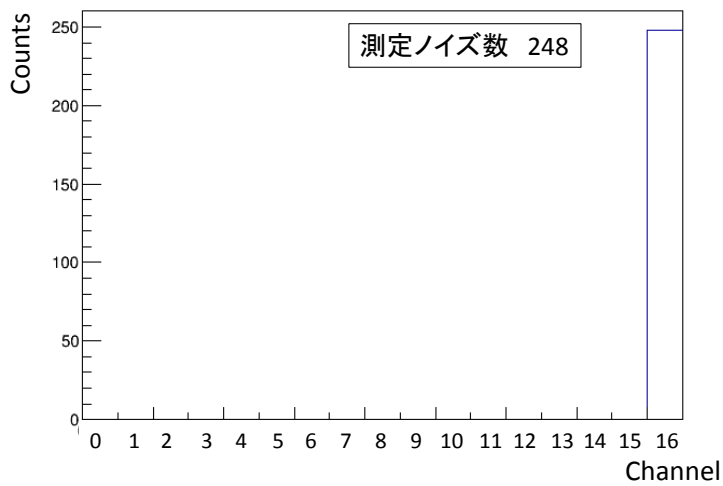


図 56: TARGET7 における同時にスパイクノイズを検出したチャンネルの数

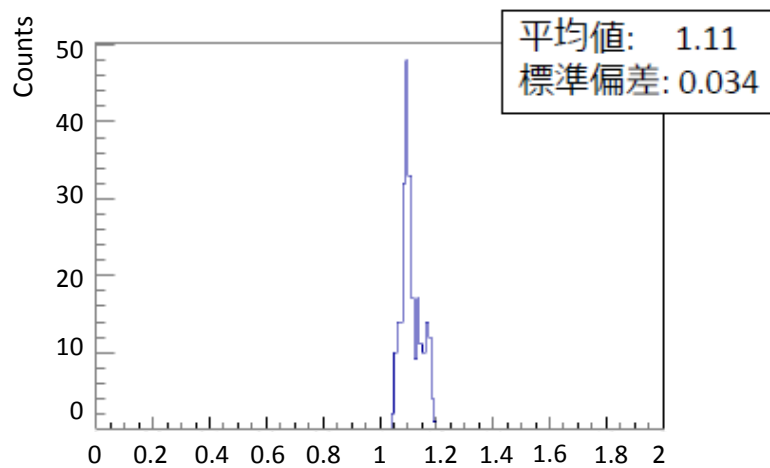


図 57: TARGET7 のチャンネル 1 に対するチャンネル 6 のスパイクノイズの波高の比

そこで図 58 に示すように、スパイクノイズを観測するチャンネルを一つ定め、このチャンネルにおいてスパイクノイズが検出されたら、別のチャンネルからスパイクノイズを差し引く方法により、スパイクノイズを除去する。

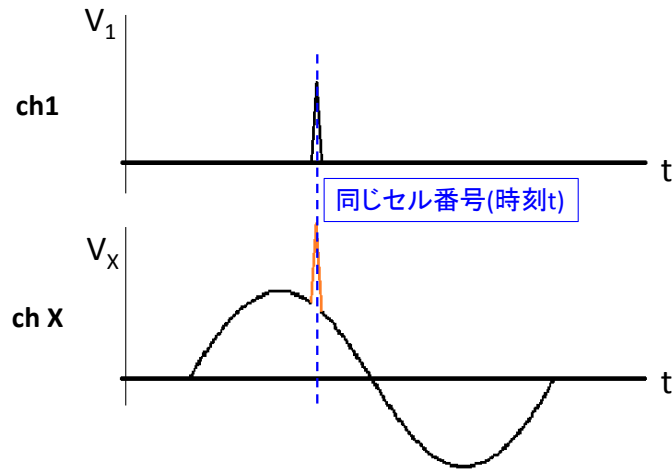


図 58: スパイクノイズの除去方法

本測定では ch1 をスパイクノイズのモニタリングに用い、波形測定チャンネルのスパイクノイズを除去した。なお、差し引く電圧値 $V_{correct}$ は以下のように定義した。

$$V_{correct} = V_x[t] - \alpha_{1x}V_1[t]$$

ここで $V_x[t]$ はサンプリングチャンネル x での時刻 t における電圧値、 α_{1x} はチャンネル 1 に対するチャンネル x におけるノイズの波高の係数である。時刻 t については、セル毎時間応答ばらつきを補正した後の時刻に対する電圧値データを使用するため、セル番号ではなく時刻 t と表記している。

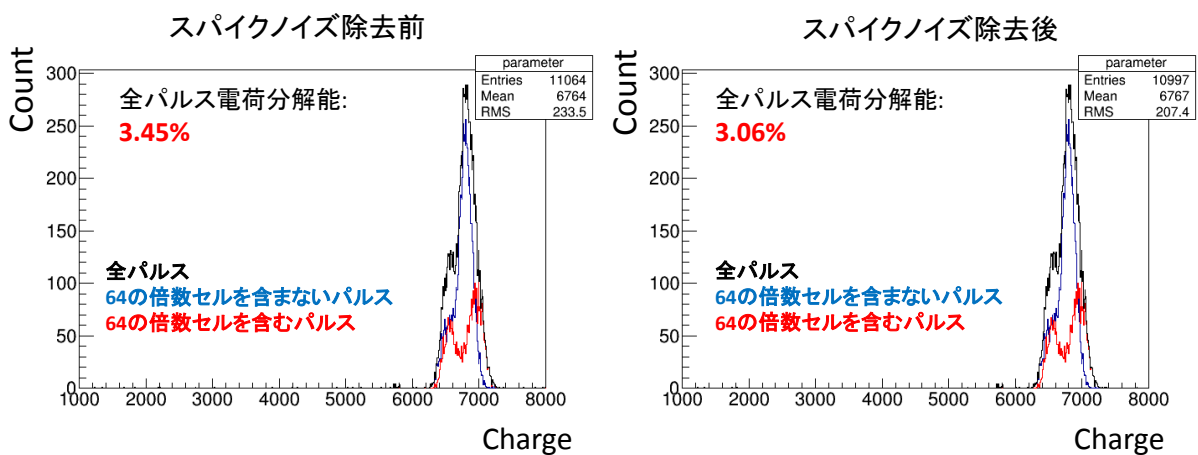


図 59: 電荷分解能の測定結果 (左:スパイクノイズ補正前 右:補正後)

図 59 は、スパイクノイズ除去前後の電荷分解能の測定結果である。スパイクノイズの除去によ

り、電荷分解能は0.39ポイント改善するという結果が得られた。全パルスのカウント数が減っているのは、スパイクノイズがパルスとして検出されなくなったためである。

また、前項の応答時間ばらつきの補正とスパイクノイズの除去を組み合わせさせた結果を、以下の図60に示す。

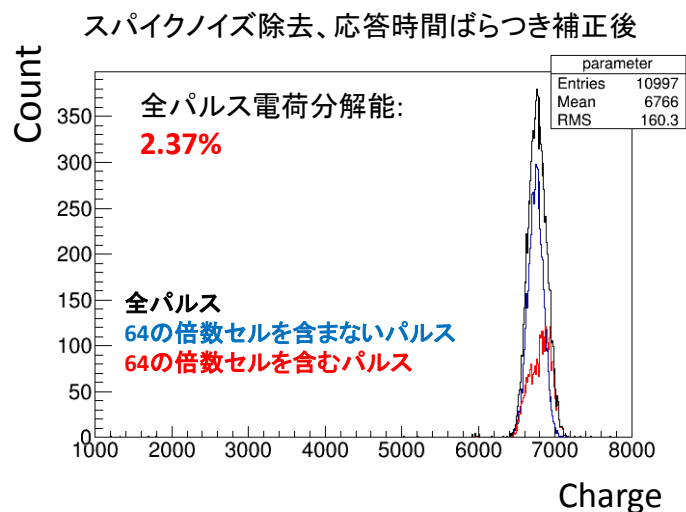


図 60: スパイクノイズ除去、応答時間ばらつき補正後

図60が示す応答時間ばらつき補正とスパイクノイズの除去を組み合わせさせた結果は、図59左図のどちらも行わない場合の電荷分解能3.45%に比べて、1.08ポイントの改善が見られた。また、今回の結果より得られた電荷分解能は、望遠鏡全体の電荷分解能の目標値に対し小さく、TARGETによる電荷分解能への影響は十分改善できる値であるという結果が得られた。

4 発光ダイオード (LED) 光を用いた応答時間ばらつき測定

4.1 LED 光を用いた測定の意義

TARGET が搭載されるカメラには、合計約 2000 チャンネル分の信号入力チャンネルがあり、それぞれについて応答時間のずれを測定する必要がある。これに対し前章で述べた方法は、ファンクションジェネレータと各チャンネルを接続する。実際に望遠鏡を動かす際にチャンネル一つ一つを接続することは難しい。

そこで本章では図 61 に示すように、TARGET カメラモジュールに光検出器 SiPM を接続し、LED から周期的に光を照射することで周期波のデータを取得し、ばらつきを一括補正する方法について検討する。LED を用いる理由として、TARGET が用いられる望遠鏡のカメラ CHEC は、フォトンキャリブレーションの後に LED を用いることを挙げる。フォトンキャリブレーションに用いる LED が十数 MHz の周波数で光らせることが可能であれば、共通の LED を用いて応答時間ばらつき補正も可能と考えられる。この方法は、TARGET の入力チャンネルとファンクションジェネレータをそれぞれ接続する必要がなく、カメラの光検出器全てに光を同時に照射するため、2000 チャンネル全ての一括補正に有用である。

なお、本測定における応答時間ばらつきには、TARGET7 モジュールの応答時間に加え、SiPM の応答時間のばらつきの寄与も含まれる。ただし、SiPM の応答タイミングが TARGET のセル毎に決まった値でなければ、応答時間ばらつきの計算過程でなまされてしまう。そのため本測定では、カメラの各ピクセルを構成する回路全体の応答時間ばらつきを測定するが、実際は SiPM 以降の TARGET モジュールの各入力チャンネルの応答時間ばらつき測定となる。

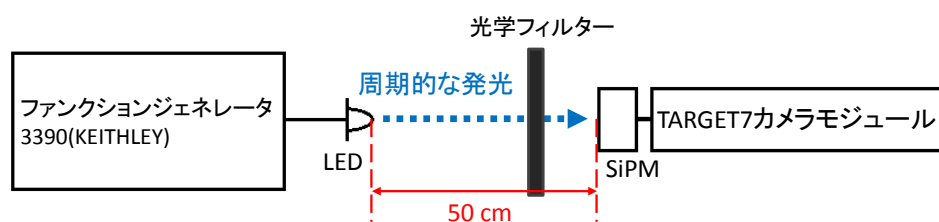


図 61: LED 光を用いたばらつき測定環境

本測定では、カメラに搭載される TARGET の全チャンネルの応答時間ばらつきの一括補正の準備段階として、光の入射に対し出力が一つの SiPM に周期的に LED 光を照射し、SiPM からの出力波のデータが、応答時間ばらつき測定に十分使用できるかどうかを確認した。このとき LED と SiPM の間を 50cm 離れた状態で、LED を光らせた。使用した LED は Bivar 社製の UV3TZ-400-30 で、波長のピークは 400nm である [35]。これは CHEC のフォトンキャリブレーションに実際に使用される LED を参照した。また、SiPM は名古屋大学の先行研究において最も光検出効率の良い結果が出た、浜松ホトニクス社製の S13360-6075CS である [36]。また、光学フィルターには Edmund industrial optics 社の ND フィルター #65-819 を用いた。これは光量を 3.2% に減光するフィルターであり、測定データが TARGET で観測できる最大値に達してしまうことを抑えるために導入した。

LED に入力する波形には、10MHz、5Vpp パルス波と、50MHz、5Vpp サイン波を使用した。なお、どちらもオフセット電圧は 2.5V である。ここでパルス波を用いる理由は、TARGET が搭載されるカメラ CHEC のフォトンキャリブレーションでは、本来観測するチェレンコフ光由来の

パルスを模した、半値幅が約 4ns のパルス光を LED に入射し、発光させるためである [35]。ただし本測定で使用したファンクションジェネレータの仕様より 4ns の発光が設定できないため、ここでは半値幅が 20ns のパルス光を発光させて測定を行った。また先行研究 [34] より、使用する波形の周波数が大きいほど応答時間ばらつきの測定精度が向上するため、このファンクションジェネレータで設定できる最大周波数の 10MHz を設定している。また 50MHz サイン波を使用したのは、3 章で使用した入力波の周波数に合わせ、周波数の大きい波形でより精度の良い測定を行うためであるが、このファンクションジェネレータで 50MHz が設定できるのはサイン波のみであったためである。

4.2 ファンクションジェネレータを用いた応答時間ばらつきの測定結果

LED 光を用いた応答時間ばらつき測定結果を評価するためには、リファレンスとなる測定結果が必要である。これは、TARGET の本来のセル毎応答時間ばらつきを厳密に求めることが不可能であるためである。したがって、本来のセル毎応答時間ばらつきと言える値を定め、これを LED を用いた測定結果と比較する方法をとる。本測定では、前章で既に測定精度が見積もられたファンクションジェネレータからサイン波を入力する方法で、TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定を行い、得られた結果をリファレンスとした。

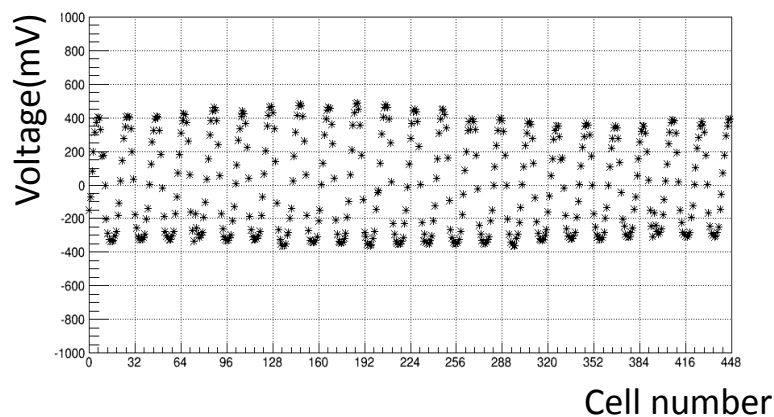


図 62: TARGET7 モジュールからの出力サイン波の例

図 62 は、TARGET7 モジュールから出力したサイン波の例である。ここでは 3 章を踏まえ、周波数 50MHz、振幅 500mVpp のサイン波を TARGET7 モジュールのチャンネル 1 に、ファンクションジェネレータから直接出力した。使用したサイン波イベントは 3 万イベントで、damping factor の係数 A は 20 とした。また TARGET7 モジュールにおいても、波形サンプリングは 64 個のサンプリングセルを使い回して行っている。そのため 64 セル周期の測定結果が得られることを予想して、1 イベントあたりのデータ長を最大の 448 セルとし、64 セル周期性が十分見られる長さを設定した。なお、図 62 には出力したサイン波の振幅にうねりが見られる。この原因については今後究明していく必要がある。本測定では、取得したサイン波の振幅より 50MHz の波形が取れていること、応答時間ばらつき測定は 0 交点のみを見るため、振幅の情報が重要でないことから、測定結果に 64 セルの周期が見られることに重点を置き、応答時間ばらつき測定を行った。

図 62 の振幅は 800mVpp であり、入力サイン波の振幅より大きくなっている。これは TARGET7 モジュールの入力端子直後に信号の整形増幅アンプがあり、入力波が増幅されているためである。

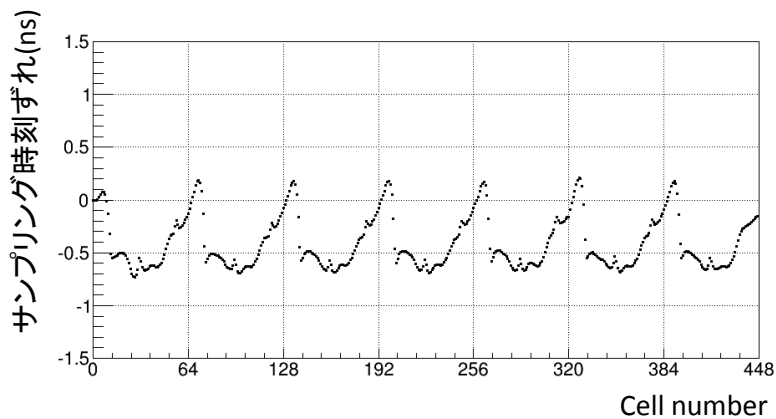


図 63: TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定結果

図 63 は、上のサイン波 3 万イベントを用いて、TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定を行った結果である。TARGET7 モジュールに搭載されている TARGET7 ASIC は、3 章で測定した TARGET7 評価ボード上の TARGET7 ASIC とは、構造は同じであるが別固体であるため、図 63 は前章と結果が異なっている。ただし TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定結果には 64 セル毎の周期性が見られており、期待できる結果が得られていると言える。したがってこの結果をリファレンスとし、以降の LED 光を用いた応答時間測定結果と比較し、考察を行う。

4.3 LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定環境

前項までの結果を踏まえ、LED 光を周期的に光らせ、TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定を行った。以下の図 64 は、測定環境の写真である。暗箱の中に LED を設置し、実際のフォトンキャリアレーションで使用する LED とカメラ間の距離を参考に、LED から 50cm 離れた位置に SiPM を設置して LED 光の照射を行った [35]。また図 65 は、LED および SiPM 周りの回路図である。

本測定では、4.1 章で述べた 10MHz パルス波および 50MHz サイン波をファンクションジェネレータから LED に出力し、LED を光らせた。この測定における SiPM への印可電圧は、推奨動作電圧である 59V とした。また SiPM に電圧をかけるに当たり、回路全体を流れる電流のリミット値を 5.05mA に設定した。これは LED を光らせた際に、SiPM からの電荷の最大出力を許容する値である。

4.3.1 LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定結果

ここでは LED を 10MHz パルス波および 50MHz サイン波で光らせ、SiPM で観測した結果による、TARGET7 モジュールの応答時間ばらつき測定結果を述べる。また、ファンクションジェネレータから直接サイン波を入力した場合をリファレンスとし、どの程度の測定精度があるかを見積もる。

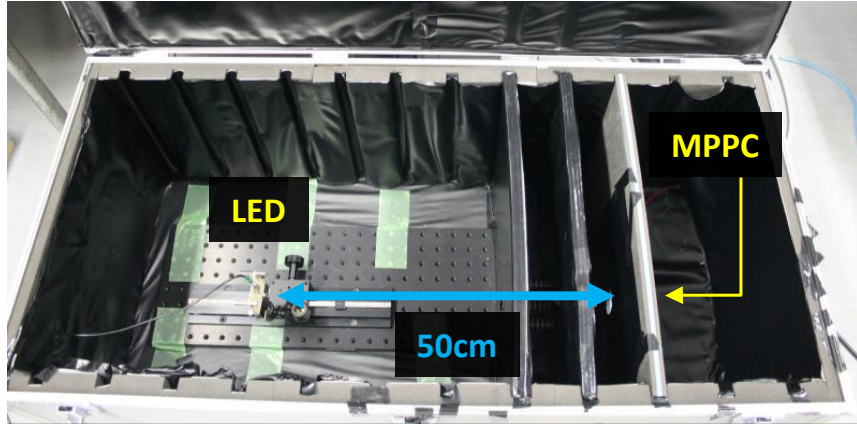


図 64: 測定環境

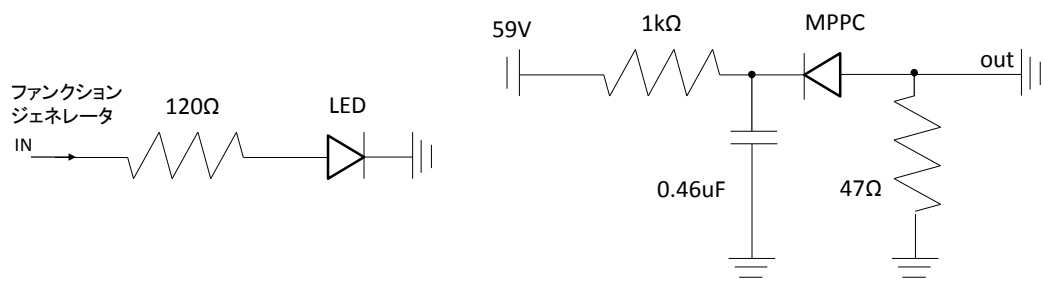


図 65: LED および周りの回路図 (左) SiPM 周りの回路図 (右)

TARGET7 モジュールによるサンプリング波形の PC 出力結果

今回使用した 10MHz パルス波は、3 章における 50MHz サイン波 3 万イベントによる測定シミュレーションに対し周波数が 5 分の 1 であり、また立ち上がりタイミングによる周期判定を行わない。そのため、周波数の差についてはイベント数を 5 倍、立ち上がりの判定を行わない分イベント数をさらに 2 倍し、パルス波 30 万イベントについて応答時間ばらつき測定を行った。

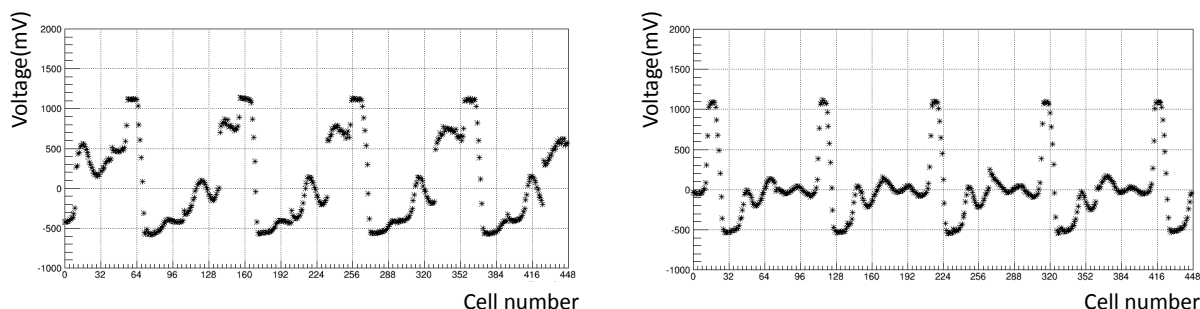


図 66: LED をパルス波で光らせたときの TARGET7 モジュールからの PC への出力結果 (左: 光学フィルターなし、右: 3.2%光学フィルターあり)

図 66 は、LED をパルス波で光らせた時の TARGET7 モジュールから PC への出力結果を、電圧値変換した例である。左図は光学フィルターを挟まずに LED 光を SiPM に照射した結果であり、TARGET7 モジュールからの出力波は、立ち上がりが歪み、約 1000mV から約 -500mV までの立下りは急な単調減少の形を示している。これは、測定波の最大値が TARGET で測定できる最大値で飽和してしまい、パルス波立下り後のアンダーシュートによる歪みの影響が大きいためと考えられる。ただし立ち下りの周期が約 100ns であることに着目すると、出力波は入力波と同じ 10MHz のタイミングを示していると言える。そこでこの測定では、電圧値が 1000mV から -500mV まで急激に単調減少する点を 0 交点とするため、800mV を電圧値 0 のラインとして定義し直し、立ち上がりの歪みの大きい部分を排除した。

他方、右図は光量を 3.2%に減光するフィルターを挟み、LED 光を SiPM に照射した結果である。こちらは左図に比べ、パルス波の立ち上がりがはっきりしていることが分かる。これは、フィルターの減光により、アンダーシュートの影響が抑えられたためと考えられる。なお、出力波は入力波と同じ 10MHz のタイミングを示している。またこの測定でも、電圧値の 0 ラインのノイズの影響により、パルスの立ち上がり、立ち下がりが定義できないため、500mV を電圧値 0 のラインとして定義しなおした。更に 0 交点は、図 66 左と同様、パルスの立ち下がりのみに着目し、1 周期を定義した。

また LED を 50MHz サイン波で発光させた場合の TARGET7 モジュールからの出力は、図 67 のとおりである。TARGET7 からの出力は、振幅に揺らぎがあるものの、50MHz サイン波の形をとっている。

データが飛んでいるサンプリング波形の処理

ここで、TARGET におけるサンプリングデータの飛びについて言及する。図 68 は、TARGET7 による周波数 10MHz、振幅 100mVpp のパルス波の例である。TARGET によるサンプリングデータ、スパイクノイズの混入に加え、サンプリングデータが途切れてしまう場合があることが、測

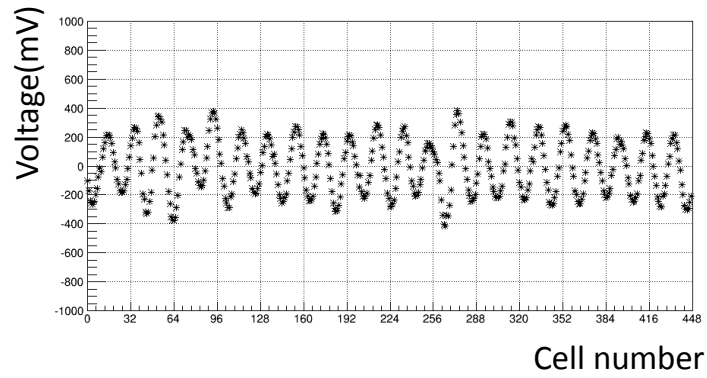


図 67: LED をサイン波で光らせたときの TARGET7 モジュールからの PC への出力結果



図 68: スパイクノイズの混入とデータ飛びの例

定により分かっている。このようなデータを使用した応答時間ばらつき測定では、測定過程における1イベントあたりのセル毎時間幅の伸び縮み幅が大きくなる。そのため図69左の測定結果のように64セル周期性が見えず、応答時間ばらつき測定ができていないことがある。

したがってこの測定では、データの飛んでいる波形を検出し、これの処理を行わないことで、データの飛んでいる波形の影響を抑えた。具体的には、サンプリング波形が理想周期に対し10ns以上ずれた場合は、サンプリングセル毎の応答時間ばらつきに対し極端に短いとして、この波形についての処理を行わないとした。

図69右は、データの飛んでいる波形の処理を飛ばした場合の、応答時間ばらつき測定結果である。64セル周期性が見えており、応答時間ばらつきの測定ができていることが分かる。

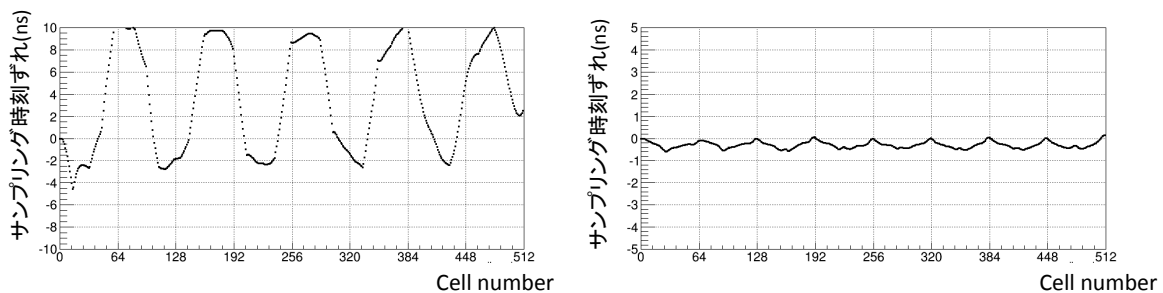


図69: データが飛びのあるイベントを含むTARGET7の応答時間ばらつき測定結果(左) データ飛びのあるイベントの処理を飛ばした場合の測定結果(右)

LED光を用いた応答時間ばらつきの測定結果

この測定では、30万のパルス波イベントを用いて測定を行う。ここでTARGET7モジュールのイベントトリガーは、この測定環境において t 秒あたり $120t+320$ 回発生し、適切な t を設定することにより任意の数のイベントを取得する。ただし t 秒のカウントはpythonにおける`time.sleep(t)`コマンドにより行っており、使用したPCの内部処理の状況に依存するため、常に一定の t 秒が設定できるとは限らない。本測定では $t=2500$ とし、得られた29万8千イベントについて、応答時間ばらつきを測定した。

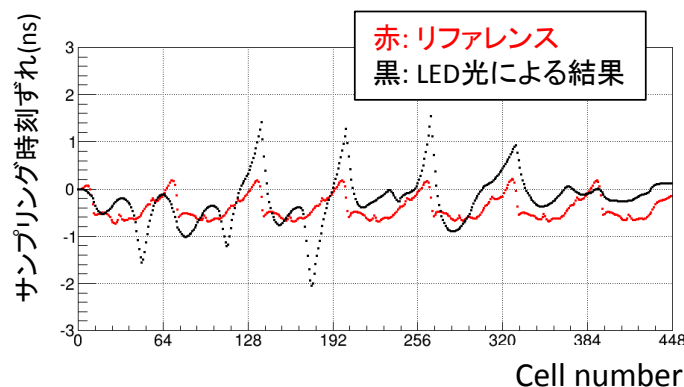


図70: 減光フィルターなし、10MHzパルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果

図70は、LEDとSiPMの間にフィルターを挟まない状態(出力波例: 図66左)で、10MHzパ

ルス波でLEDを光らせた場合の、TARGET7モジュールのセル毎応答時間ばらつきの測定結果である。赤で示したリファレンスは、図63の結果をプロットしたものである。10MHzパルス波でLEDを光らせた場合の結果は、64セル周期性がほとんど見えておらず、リファレンスの値から大きく外れているデータが目立つ。

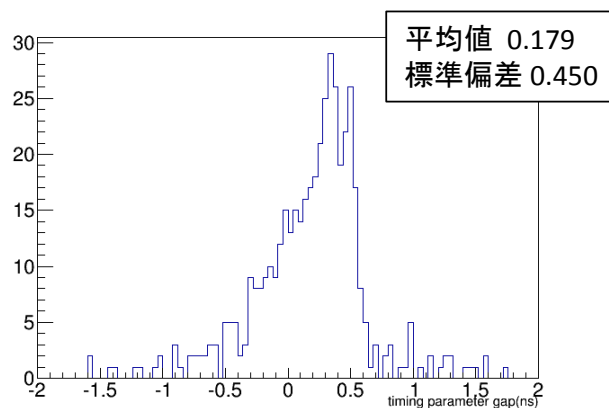


図 71: 減光フィルターなし、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性

図 71 は、図 70 の LED 光による測定結果から、リファレンスの値をセル毎に引いたデータをヒストグラムにし、リファレンスとの一致性を確認したものである。差が 1ns 以上と大きく外れているセルが見られ、応答時間ばらつきの測定が不十分であると言える。

原因として考えられることは、0 交点の抽出が不十分であったことである。この測定では、図 66 において、電圧値が 1000mV から -500mV まで急激に単調減少する点を 0 交点とするため、同じ図における 800mV を電圧値 0 のラインとして定義し直し、立ち上がりの歪みの大きい部分を排除している。しかし、図 66 の 2 周期目の波形のように、歪みが 800mV 付近に現れると、0 ラインと交差してしまい、期待しない 0 交点を抽出してしまう。したがって、歪みの軽減や期待する 0 交点を抽出できる工夫をする必要がある。

そこで以下では SiPM に照射する光をフィルターにより減光し、TARGET で測定できる最大値における飽和を緩和し、歪みの軽減を図った。

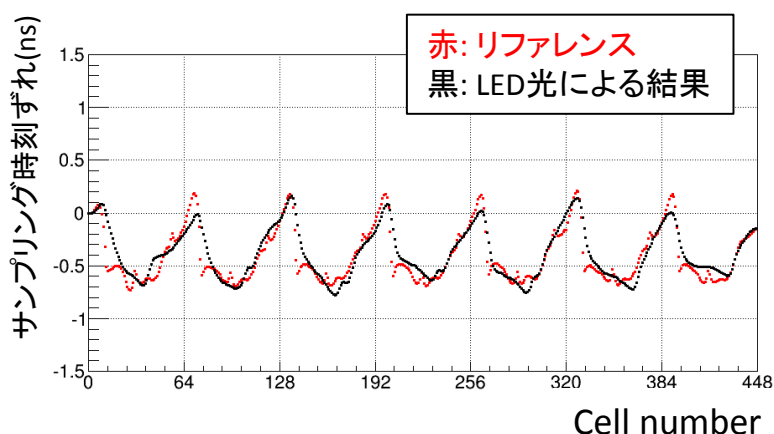


図 72: 3.2%減光フィルターあり、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果

図 72 は、LED と SiPM の間に 3.2%の減光フィルターを挟んだ状態（出力波例: 図 66 右）で、10MHz パルス波で LED を光らせた場合の、TARGET7 モジュールのセル毎応答時間ばらつきの

測定結果である。測定結果は図 70 に比べ、64 セル周期性がはっきりと見えている。また、測定結果はリファレンスの値に良く重なっていることが分かる。

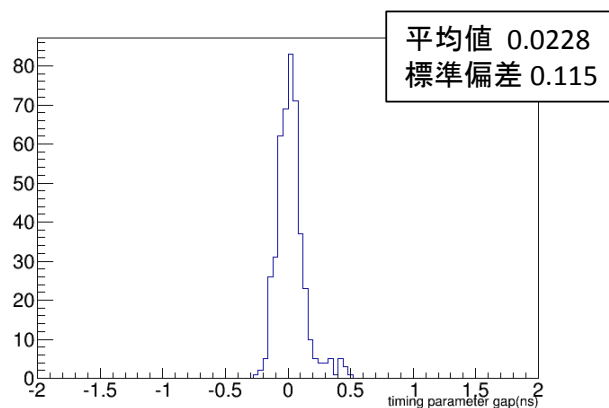


図 73: 3.2%減光フィルターあり、10MHz パルス波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性

図 73 は、図 72 の測定結果のリファレンスとの一致性を確認したものである。標準偏差は 0.1ns であり、減光フィルターを挟まない場合に比べ、リファレンスとの一致性が良くなっていることが分かる。

この結果の考察として、測定に使用した波形データの立ち上がり部分における、アンダーシュートによる歪みが軽減されたことを挙げる。フィルターを挟んだことにより、TARGET から PC に出力したデータの立ち上がりがはっきり見えるようになったことは、図 66 の説明において述べたとおりである。これにより、アンダーシュートによる歪みの影響が軽減され、期待する 0 交点が抜き出せるようになったため、リファレンスとの一致性が良くなったと考えられる。

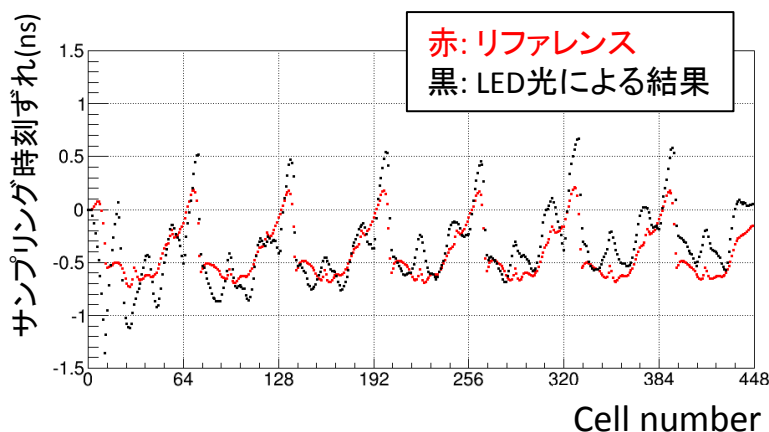


図 74: 50MHz サイン波による発光時の応答時間ばらつき測定結果

また、以下では 50MHz サイン波を用いて LED を光らせ、応答時間ばらつきを測定した結果について述べる。図 74 は、50MHz サイン波で LED を光らせた場合の、TARGET7 モジュールのセル毎応答時間ばらつきの測定結果である。50MHz サイン波で LED を光らせた場合、応答時間ばらつきの測定結果は、64 セルの周期性が見えており、ばたつきがあるもののリファレンスの形に添っている様子が確認できる。

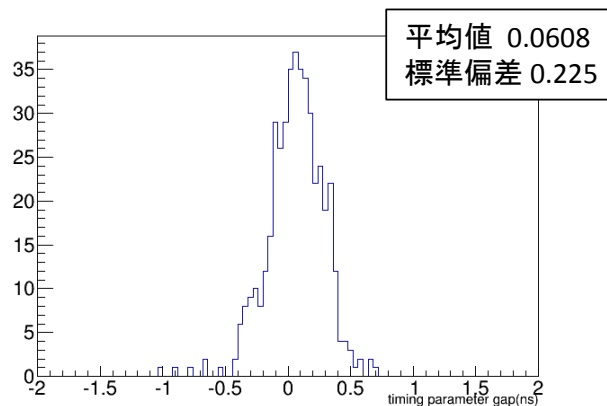


図 75: 50MHz サイン波による発光時の応答時間ばらつき測定結果のリファレンスとの一致性

図 75 は、50MHz サイン波で LED を光らせた場合の応答時間ばらつき測定結果から、リファレンスの値をセル毎に引いたものをヒストグラムにしたものである。ピークが 0 付近にあり、応答時間ばらつき値がリファレンスに沿っていること、フィルターを挟まない 10MHz パルス波の場合と比べて、精度よくばらつき測定ができていると言える。しかし、減光フィルターを挟んだ場合に比べると、リファレンスとの一致性は悪い。

フィルターを挟まない 10MHz パルス波に比べ測定精度が良かった要因としては、先行研究より、入力波の周波数が大きいほど応答時間測定精度が向上することが挙げられる。一方、フィルターを挟んだ 10MHz パルス波による測定結果に対し精度が落ちた要因としては、図 67 に見られるような出力波の振幅揺らぎが、0 交点の決定に影響を与えたためと考えられる。

本測定により、応答時間ばらつき測定精度には、波形の歪みによる 0 交点の決定精度が特に重要であるという可能性が示された。そのため、今後はより期待できる 0 交点を抽出できる工夫や、より歪みの少ない波形について、LED を発光させ、より精度よく応答時間ばらつき測定が可能な条件を求めていく必要がある。

4.4 シミュレーションによる LED 光を用いた応答時間ばらつきの測定精度

ここでは、4.4 章の応答時間ばらつき測定結果に対する測定精度について述べる。LED に入力した波形は、入力波形に対する LED の反応、LED 光を受けた SiPM の反応、TARGET7 カメラモジュールの入力端子直後の整形増幅回路により変形する。そこで本項では、LED をパルス波で発光させた場合について、応答時間ばらつきの測定シミュレーションを行い、応答時間ばらつきの測定精度を見積もった。なお TARGET7 モジュールからの出力は、50MHz サイン波の形をとっているため、サイン波を用いた場合の応答時間ばらつき測定精度は、3 章のシミュレーションの結果に沿うものとする。

以下では図 66 の示す、LED をパルス波で光らせた時の TARGET7 モジュールによる測定結果の急激な立ち下がりに着目し、10MHz パルス波による応答時間ばらつき測定シミュレーションした結果について述べる。以下の図 76 は、シミュレーションに使用したパルス波の例である。

このシミュレーションでは、図 66 の出力波形のパルスの立ち下がり部分である、約 1000mV から約 -500mV まで急激に単調減少するタイミングでは、歪みの大きいパルスの立ち上がり時より 0 交点が定めやすいと考える。そこで、パルスの立ち上がり時の 0 交点は使用せず、図 76 のパルスの立ち下がり時の 0 交点でパルス波 1 周期を定義し、応答時間ばらつきの測定シミュレーショ

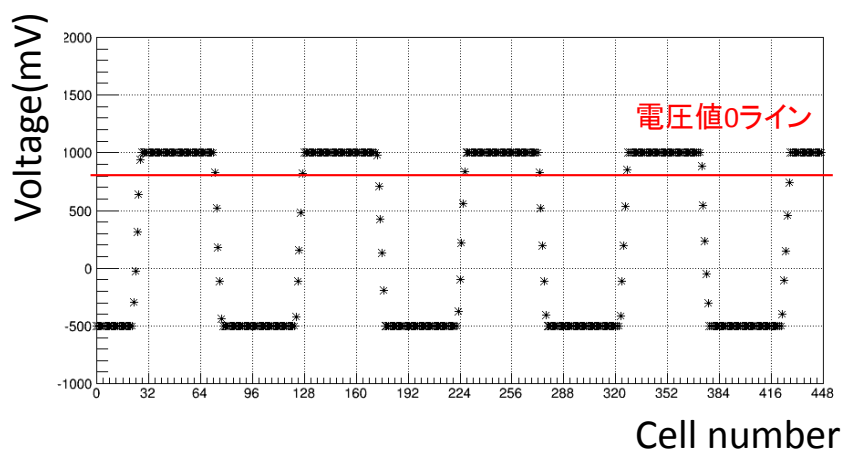


図 76: シミュレーションに使用した 10MHz パルス波

ンを行った。また、前章では 0 交点を決めるラインが周期波の振動中心となるようにとっていたが、ここでは図 76 の電圧値 800mV のラインを電圧値 0V のラインとする。これは、図 66 の振動平均付近ではデータの揺らぎが激しく、揺らぎの少ない 800mV のラインについて 0 交点を決定するためである。

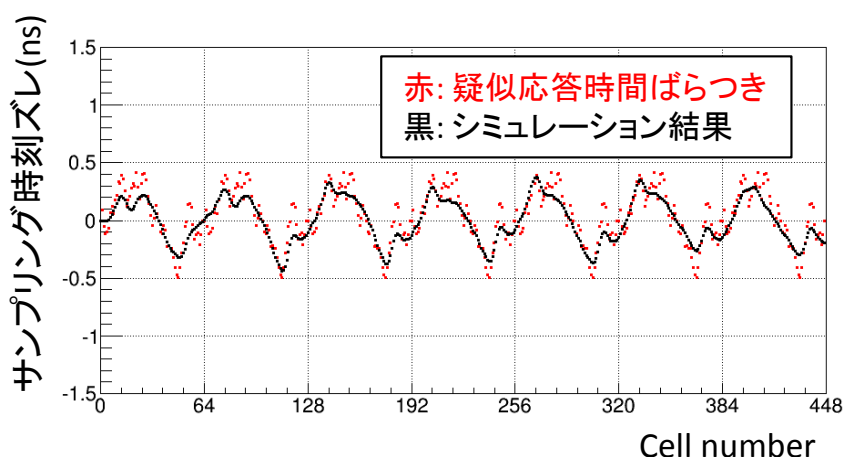


図 77: 10MHz パルス波を用いたシミュレーションの結果

図 77 は、パルス波 10MHz のイベントの立ち下がり時のみに着目して、応答時間ばらつきを測定した結果である。ここでは疑似的な応答時間ばらつきとして、前章で使用した TARGET7 の応答時間ばらつき測定結果をもとにした値を定義した。この結果より、シミュレーションの結果は 50MHz サイン波によるシミュレーションに比べ、細かい応答時間ばらつきの変動は追えていないものの、大まかな変化には対応できていることが分かる。

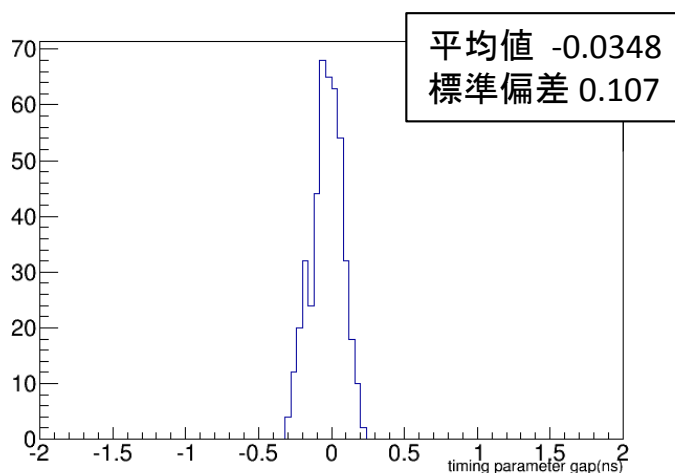


図 78: シミュレーションによる応答時間ばらつき測定精度

また、図 78 は、図 77 の疑似応答時間ばらつきからシミュレーション結果を引いた値をヒストグラムとし、シミュレーション結果がどの程度、もともと定義した応答時間ばらつきに一致するかを確認したものである。この結果より、10MHz パルスの立ち下がりには 0 交点を求めた測定では、0.1ns の精度で応答時間ばらつきが測定できると言える。これに対し実際の TARGET7 モジュールの波形は、ファンクションジェネレータからの出力波形に比べ揺らぎが大きく 0 交点が正しく決定されないことにより、測定精度が下がった可能性が考えられる。

5 まとめ

本研究では、CTA のデュアルミラー小口径望遠鏡に用いられる波形記録回路 TARGET について、サンプリングセル毎の応答時間ばらつきの測定アルゴリズムの測定精度を評価した。その結果、本測定では damping factor の係数 $A = 20$ の場合、周波数 50MHz、振幅 500mVpp のサイン波を 3 万イベント用いると測定精度が最も良く、0.13ns の精度で応答時間ばらつきの測定ができることが分かった。実際にこのアルゴリズムを用いて TARGET の応答時間ばらつきの測定を行った結果、TARGET の応答時間ばらつきはサンプリングセルの周期と同じ、64 セル周期で変化するという結果が得られた。また damping factor が応答時間ばらつきの測定早さを決める値であることから、測定時間短縮を狙い、応答時間ばらつき測定に有効な damping factor とイベント数の組み合わせを求めるシミュレーションを行った。その結果、 $A < 10000$ においては測定精度が 0.15ns 以下で安定して測定ができるという結果が得られた。以上の結果は、本測定で用いた応答時間ばらつきアルゴリズムが、サブナノ秒レベルの精度を持ち、CTA における時間情報解析に十分役立てられると考えられる。ただし、このアルゴリズムにはイベント数を増やしていくと値が発散してしまう問題や、ノイズが混入したデータの処理など、まだ改善の余地があるため、今後は応答時間測定精度のさらなる向上を目指し、改良を重ねていく。

また本研究では、上記 TARGET の応答時間ばらつき測定結果を用いて、応答時間ばらつきの補正を行い、電荷分解能の変化を調べた。その結果、応答時間ばらつきの補正により、電荷分解能は 0.39 ポイント改善するという結果が得られた。また TARGET が取得したデータにスパイクノイズが混入することを受け、別チャンネルでモニタリングしたスパイクノイズの波高と観測タイミングを用いて測定チャンネルのノイズの除去を行った結果、応答時間ばらつき補正と合わせた電荷分解能は計 1.08 ポイント改善した。本測定で使用したチャンネルの電荷分解能は、上記補正により 2.37% となり、小口径望遠鏡の電荷分解能目標値に対し十分小さく、望遠鏡のパフォーマンスへの影響は非常に小さいと考えられる。今後はより詳細な比較のため、別のチャンネルについても電荷分解能の測定および補正を行うことを検討している。

さらに本研究では、LED 光を用いた応答時間ばらつき測定を行い、TARGET が用いられるカメラの全ピクセルの応答時間ばらつきの、一括補正を見込んだ測定精度を求めた。その結果、周波数 10MHz、半値幅 20ns パルス波で LED を光らせた場合は期待される 64 セル周期の応答時間ばらつきが見られなかった一方、50MHz サイン波で LED を光らせた場合は、64 セル周期性と言える結果が見られ、リファレンス結果と比較して 0.23ns の精度での測定が可能であるという結果が得られた。シミュレーションによる 10MHz パルスを用いた測定では 0.11ns で応答時間ばらつき測定ができるという結果と比較すると、10MHz の LED 光による測定結果に 64 セル周期性が見られなかった原因としては、出力波形の立ち上がり波形の歪みにより、0 交点が期待できるタイミングから離れたタイミングに検出されてしまうことが考えられる。波形の歪みによる期待しないタイミングでの 0 交点の検出は、今回応答時間測定結果に 64 セル周期性が見られた、50MHz サイン波で LED を光らせた場合も問題になる可能性がある。そのため、今後はより期待できるタイミングの 0 交点を抽出する工夫や、LED ではなくレーザーを用いた周期的な発光を用いるなど試行錯誤し、カメラの全ピクセルの応答時間を一括測定できる方法を探っていく。

A TARGET の制御、データ取得ソフトウェアのインストール方法

TARGET の制御、データ取得のための最新のソフトウェアをインストールするためには、CTA の Apache Subversion(svn) のアカウントを持っている必要がある。CTA の svn アカウントを取得したら、以下を実行することで、libTARGET および TargetDriver、TargetIO をインストールすることができる。

```
$ svn checkout svn+ssh://your_account@svn.in2p3.fr/cta/COM/CCC/libTARGET
/trunk libTARGET
$ svn checkout svn+ssh://your_account@svn.in2p3.fr/cta/COM/CCC/TargetDriver
/trunk TargetDriver
$ svn checkout svn+ssh://your_account@svn.in2p3.fr/cta/COM/CCC/TargetIO
/trunk TargetIO
```

B TARGET 波形取得スクリプト

TARGET を接続した PC(OS: Linux) 上で Python プロンプトを起動し、以下を実行して測定データを出力した。なお libTARGET による波形取得スクリプトとして TARGET7 の例を、TargetDriver の場合の波形取得コマンドとして TARGETC の例を以下に述べる。なお、以下は libTARGET および TargetIO に含まれていた python スクリプトを元に、本研究用に変更を加えたものである。

```
#libT_DataTakingT7.py

import target
import time
import struct
import configT7

IP_ADDRESS = "192.168.0.173"
kNCh = 16
kNSuper = 4
board = target.T7EvalBoard()
board.Open("0.0.0.0", 8106, IP_ADDRESS, 8105,5592405)
board.SetTimeOut(1000)
print board.GetFPGAVersion()

configT7.init(board,SBbias=0x480,CMPbias=0x480,PUBias=0xC28,CMPbias2=0x2E1,
ITbias=0x3D9,Wbias=0x3D9)
VadjN = 2194
```

```

VtrimT = 1296
SFB = 59 #SSToutFB
number = 1
ch = 6
configT7.setRunParameters(board,
                            Vped      = 0x5dc,
                            VadjN     = VadjN,
                            VtrimT    = VtrimT, #0xFFF
                            SSToutFB  = SFB, #0x03a
                            Isel      = 2630, #2630
                            WilkinsonClock=0b001,
                            RampDuration=4000, #4000
                            Nwindows  = 16, #2
                            ch        = ch,
                            selFixBuffer = 1,
                            row      = 0,
                            col      = 0)
#configT7.enableDLLFeedback(board,enable = True)
configT7.enableDLLFeedback2(board,enable = True, VadjN=VadjN)

configT7.setTimingParameters(board,SSPinLE = 0x8F,
                              # 0x8f = 0b10001111 (falling)
                              SSPinTE = 0xA3,
                              # 0xa3 = 0b10100011 (falling)
                              WR_STRB1LE = 0x14,
                              # 0x14 = 0b00010100 (rising)
                              WR_STRB1TE = 0x23,
                              # 0x23 = 0b00100011 (rising)
                              WR_ADDR_Incr1LE = 0xa3,
                              # 0xa3 = 0b10100011 (falling)
                              WR_ADDR_Incr1TE = 0xb2,
                              # 0xb2 = 0b10110010 (falling)
                              WR_STRB2LE = 0x94,
                              # 0x94 = 0b10010100 (falling)
                              WR_STRB2TE = 0xa3,
                              # 0xa3 = 0b10100011 (falling)
                              WR_ADDR_Incr2LE = 0x23,
                              # 0x23 = 0b00100011 (rising)
                              WR_ADDR_Incr2TE = 0x32)

#configT7.selectMonTiming(board,0b0101)

```

```

setVp = 2000
board.SetVpedValue(setVp)
board.GetVpedValue()

#board.EnableExternalTrigger(True)
board.EnableSoftwareTrigger(True)

#n = number of event
n= 30000

#function
fu = 10
option = "_VadjN"+str(VadjN)+"_SFB"+str(SFB)+"_VtrimT"+str(VtrimT)

#type of signal
NS = 1
def filename(x):
    if NS == 0:
        filen = "TARGET/NS_Vp"+str(setVp)+"_ch"+str(ch)+"_T7"
    else:
        #amplitude voltage(V)
        Va = 0.25
        #filen = "TARGET/V_"+str(Va*2)+"sint_Vp"+str(setVp)+"_"+str(fu)+"MHz_ch"
+str(ch)+"_T7"+option+"-"+str(x) #sin
        filen = "TARGET/V_"+str(Va*2)+"pulse_Vp"+str(setVp)+"_"+str(fu)+"MHz_ch"
+str(ch)+"_T7"+option+"-"+str(x) #pulse
        return filen
# filename = "TARGET/V_"+str(Va)+"sint_Vp"+str(setVp)+"_ch"+str(ch)+"_T7.txt"

for N in range(1,number+1):
    num1 = []
    file = open(filename(N)+".txt", 'w')
    for l in range(n):
        if l%1000==0:
            print (N-1)*n+1
            board.SendSoftwareTrigger()
            event = target.ToT5EvalBoardEvent(board.PopEvent())
            for i in range(event.GetWaveformLength()*32):
                # print i, event.GetADC(i)
                file.write(str(i)+' '+str(event.GetADC(i))+'\n')
            if l==0:
                num1.append(event.GetADC(i))

```

```

    file.close()
print board.GetNumberOfEvents()

#ROOT
import ROOT
graph = ROOT.TGraph()
cv = ROOT.TCanvas("testplot","testplot",1000,500)
pad = cv.cd()
pad.SetGridx(1)
pad.SetGridy(1)

for i in range(len(num1)):
    graph.SetPoint(i,i,num1[i])
axisX = graph.GetAxis()
axisX.SetLimits(0,len(num1))
axisX.SetNdivisions(508,0)
axisY = graph.GetAxis()
axisY.SetRangeUser(0,3000)
graph.SetMarkerStyle(7)
graph.Draw("AP")
cv.Update()
cv.Print(filename(number)+".gif")

```

```

#TD_DataTakingTC.py

import target_driver
import target_io
import time
import pdb

Numb = ""
setVp = 2000
setIsel = "DEF" #2300
bn = 8
setVpB = 1600 #1600
#input wf
Va = 0.25 #amp(Vpp = Va*2)
fu = 50 #freq MHz
rtime = 250 #read event time (30000events:250)

```

```

date = "test161031-2/"
#outdir = "/home/cta/luigi/TC_EvalBoard/data/20160705/test/"
outdir = "/home/CTA_shige/work/CTA/160818_TargetDriver/work/TC_EvalBoard/
data/"+date

#outNS = "NS_Vp"+str(setVp)+"_"+str(bn)+"cells_allch_TC.fits"
outNS = "NS_Vp"+str(setVp)+"_Isel"+str(setIsel)+"_"+str(bn)
+"blocks_allch_TC.fits"
outWF = "Vpp_"+str(Va*2)+"sin_Vp"+str(setVp)+"_Isel"+str(setIsel)+"_"
+str(fu)+"MHz_"+str(bn)+"blocks_0ch_TC"+Numb+".fits"

outfile = outdir + outWF
my_ip = "192.168.0.1"
board_ip = "192.168.0.123"

#board_def = "/home/cta/TARGET/TargetDriver/config/
TEC_FPGA_Firmware0xFEDA0003.def"
board_def = "/home/CTA_shige/work/CTA/160818_TargetDriver/TargetDriver/
config/TECT5TEA_FPGA_Firmware0xFEDA0008.def"
asic_def = "/home/CTA_shige/work/CTA/160818_TargetDriver/TargetDriver/
config/TEC_ASIC.def"
trigger_asic_def = "/home/CTA_shige/work/CTA/160818_TargetDriver/
TargetDriver/config/T5TEA_ASIC.def"

board = target_driver.TargetModule(board_def, asic_def, trigger_asic_def, 0)

board.EstablishSlowControlLink(my_ip, board_ip)
board.Initialise()
time.sleep(3)
board.EnableDLLFeedback()
time.sleep(2)
board.WriteSetting("SetDataPort", 8107)
#board.WriteSetting("SetSlowControlPort", 8201)

#board.ReconnectToServer(my_ip, 8201, board_ip, 8105)
#board.EnableDLLFeedback()
#board.WriteSetting("SetDataPort", 8107)

#board.WriteASICSetting('Write1Disable', 0, 0)
#board.WriteASICSetting('Write2Disable', 0, 0)

```



```

#
#select alternative Wilkinson clock freq
# board.WriteSetting("WilkinsonClockFreq", 0b01)
# # make V boundaries of ramp larger
# board.WriteASICSetting('SBias', 0, 1200)
# # # shorten ramp
# board.WriteSetting("RampSignalDuration", 780)
# # # increase slew rate
# board.WriteASICSetting("Isel", 0, 2286)
# # #from rough scan
# board.WriteASICSetting("PUBias", 0, 3126)
# #from rough scan
# board.WriteASICSetting("CMPbias", 0, 1499)
# board.WriteASICSetting("CMPbias2", 0, 587)

# #select alternative Wilkinson clock freq
#board.WriteSetting("WilkinsonClockFreq",0b01)
# #make V boundaries of ramp larger
# board.WriteASICSetting('SBias',0,1050)
# #shorten ramp
# board.WriteSetting("RampSignalDuration",960)
# #increase slew rate
# board.WriteASICSetting("Isel",0,2500)
# #from coarse scan
# #board.WriteASICSetting("PUBias",0,3008)
# #board.WriteASICSetting("CMPbias",0,1350)
# #board.WriteASICSetting("CMPbias2",0,625)
#

""
#160817 refer to takeTFdata
#select alternative Wilkinson clock freq
board.WriteSetting("WilkinsonClockFreq",0b01)
#make V boundaries of ramp larger
board.WriteASICSetting('SBias',0,1050)
#shorten ramp
board.WriteSetting("RampSignalDuration",510)
#increase slew rate
board.WriteASICSetting("Isel",0,2180)
board.WriteASICSetting("PUBias",0,3100)
board.WriteASICSetting("CMPbias",0,1440)
board.WriteASICSetting("CMPbias2",0,600)

```

```

time.sleep(1)
"""

#Enable synchronous trigger mode
board.WriteSetting("TriggerDelay", 250)
board.WriteSetting("TACK_TriggerType", 0x0)
board.WriteSetting("TACK_TriggerMode", 0x0)
board.WriteSetting("TACK_EnableTrigger", 0x10000)
time.sleep(1)
# #Set Vped
#board.WriteSetting("Vped_value", setVp)
#time.sleep(3)
board.WriteTriggerASICSetting("VpedBias",0,setVpB,True)
time.sleep(1)

for s in range(1):
    board.WriteTriggerASICSetting("Vped_"+str(s),0,setVp,True)

#Enable all 16 channels and enable zero supression
board.WriteSetting("EnableChannel0", 0x0001) #0xFFFF
board.WriteSetting("EnableChannel1", 0x0)
board.WriteSetting("Zero_Enable", 0x1)
time.sleep(1)

board.WriteSetting("NumberOfBuffers", bn) #bn*32
# last block not usable according to Manuel note

#board.WriteSetting("Vped_value",int(setVp))
#board.WriteASICSetting("Isel", 0, int(setIsel))

board.WriteSetting("ExtTriggerDirection", 0x1) # switch on sync trigger

time.sleep(1)

#pdb.set_trace()

kNPacketsPerEvent = 1#reading only one channel
#if multiple channels depend on FPGA settings
kPacketSize = 598#you can read it on wireshark 3:278 8:598 14:918
# check for data size in bytes
kBufferDepth = 1000

```

```

listener = target_io.DataListener(kBufferSize, kNPacketsPerEvent,
    kPacketSize)
#target_driver.TargetModule.DataPortPing(my_ip, board_ip)#akira's hack
listener.AddDAQListener(my_ip)
listener.StartListening()
print "write"
time.sleep(3)

writer = target_io.EventFileWriter(outfile, kNPacketsPerEvent, kPacketSize)
buf = listener.GetEventBuffer()
writer.StartWatchingBuffer(buf)

#pdb.set_trace()
time.sleep(rtime)

writer.StopWatchingBuffer()
#board.WriteSetting("ExtTriggerDirection", 0x0)

time.sleep(1)

#board.CloseSockets()
#buf.Flush()
writer.Close()
listener.StopListening()
time.sleep(1)
board.WriteSetting("ExtTriggerDirection", 0x0)
buf.Flush()

board.CloseSockets()

```

C 応答時間ばらつきの測定アルゴリズム

サンプリングセル毎の応答時間ばらつきは、解析用 PC(OS: Linux) で以下の C++ ファイルを実行して算出した。このプログラムは、先行研究 [33][34] の方法を元に、TARGET 用に改良を加えたものである。なお「testdata.bin」は TARGET から出力した ADC データを電圧値に変換したものである。

```

/*JitterCal.cpp*/

#include<iostream>

```

```

#include<fstream>
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<string.h>
#include<stdlib.h>

/*TARGET*/
const int bn = 14; //block number
const int cn = bn*32; //cell number
const double sf = 1; //sampling freq (GSa/s)
/*imput sinusoid*/
const double wff = 0.01; //input sinusoids freq (GHz)
const int wfamp = 500; //input sinusoids amplitude (mVpp)
const int events = 298000; //input events
const char fname[128] = "testdata.bin"; //input data file
/*jitter*/
const int dampA = 20; //damping factor
const int Manual0Level = 800; //redef zeroLevel=zeroLevel+Manual0Level

/*-----*/
int AnalyzeWF(double wf[cn], double cellT[cn], double* pcellT[cn]);
int main(void){
    FILE *fin;
    std::ofstream fout1;
    std::ofstream fout2;
    std::ofstream fout3;
    std::ofstream foutall;
    std::ofstream foutdev;
    char filew[100]; //write jitter
    char filen[100]; //write convergence n1,n2,n3
    int event = 1000; //cal cycle
    int n1 = 63;
    int n2 = 100;
    int n3 = 71;
    double L[cn*event];
    double wf[cn];
    double cellT[cn];
    double* pcellT[cn];
    int index;
    int t;

    if (Manual0Level!=0){

```

```

std::cout << "Manual mode Enabled." << std::endl;
std::cout << "Manual zeroLevel is " << Manual0Level << "mV" << std::endl;
}

for (int i=0; i<cn; i++){
    cellT[i] = 1.0/sf*(float)i;
    pcellT[i] = &cellT[i];
}

sprintf(filew, "./wf_vol_binary/%s", fname);
fin=fopen(filew, "rb");

if(fin==NULL){
    std::cout << "Error:Could not open input_timing file:" << std::endl;
    std::cout << filew << std::endl;
    return 1;
}

/*open wfile*/
sprintf(filen, "convergence-cell%d.txt", n1);
fout1.open(filen);
sprintf(filen, "convergence-cell%d.txt", n2);
fout2.open(filen);
sprintf(filen, "convergence-cell%d.txt", n3);
fout3.open(filen);

/*loop cal*/
for (int j=0; j<events/event; j++){
    std::cout << j << std::endl;
    fread(L, sizeof(L), 1, fin);

    /*calculate jitter*/
    for (index = 0; index<event ;index++){
        for(int i=0; i<cn; i++){
            wf[i]=L[index*cn+i];
        }
        t = AnalyzeWF(wf, cellT, pcellT);
        fout1 << cellT[n1]-(n1/sf) << std::endl;
        fout3 << cellT[n3]-(n3/sf) << std::endl;
        fout2 << cellT[n2]-(n2/sf) << std::endl;
    }
} //loop cal

```

```

fout1.close();
fout2.close();
fout3.close();

sprintf(filen,"jitter.txt");
foutall.open(filen);
for(int i=0; i<cn; i++){
    foutall << cellT[i]-i/(float)sf << std::endl;
}
foutall.close();
fclose(fin);

return 0;
}

/*-----*/

int AnalyzeWF(double wf[cn], double cellT[cn], double* pcellT[cn])
{
int i, i1, i2, j, zx, zeroXing[cn], edge, nx, correctedN, k, xcell;
double damping, Tsf, Twff, zeroLevel, ta, tb, dt, corr, remember[cn],tt;
/*damping factor*/
damping = (sf/10000)*dampA;
/*number of wave*/
Tsf = 1/sf;
Twff = 1/wff;
nx = (int)(cn*(Tsf/Twff));

for (edge=0; edge<1 ; edge++){ //edge0:falling 1:rising
/*find edge of zero crossing*/
for (i=0,zx=0; i<(cn-1) ; i++){
    if (edge ==0){
        if (wf[(i+1)]<0 && wf[i]>0){
            zeroXing[zx++]=i;
        }
    }else{
        if (wf[(i+1)]>0 && wf[i]<0){
            zeroXing[zx++]=i;
        }
    }
}
}
}

```

```

/*zero level*/
if (zx==0){
    std::cout << "zeroxing cell is not found" <<std::endl;
    exit(0);
}
for (i=zeroXing[0], zeroLevel=0; i<zeroXing[zx-1]+1; i++){
    zeroLevel += wf[i];
}
xcell = (1+zeroXing[zx-1])-zeroXing[0];
zeroLevel /= xcell;
zeroLevel += Manual0Level;
if (zeroLevel < wfamp*(-1)){ //wfamp*(-1)
    std::cout << "too low zeroLevel zeroLevel= " << zeroLevel <<std::endl;
    return 0;
}
for (i=0; i<cn; i++){
    wf[i] -= (float)zeroLevel;
}

/*find edge of zero crossing with wrap-around "FIND ZEROCROSSING"*/
for (i=0,zx=0; i<(cn-1) ; i++){
    if (edge ==0){
        if (wf[(i+1)]<0 && wf[i]>0){
            zeroXing[zx++]=i;
        }
    }else{
        if (wf[(i+1)]>0 && wf[i]<0){
            zeroXing[zx++]=i;
        }
    }
}

/*Not enough waves*/
if (abs(nx - zx) > nx/2){ //nx/10
    std::cout << zx << " " << "uncorrect number of edge is found"
<< std::endl;
    return 0;
}
/*real zeroXing and calibration*/
for (i=correctedN=0; i<zx-1; i++){
    i1 = zeroXing[i];
    if (i1==(cn-1)){

```

```

    std::cout << "max No.512" <<std::endl;
    continue;
}
ta = cellT[i1] - (wf[i1]*(cellT[i1+1]-cellT[i1])/(wf[i1+1]-wf[i1]));
i2 = zeroXing[i+1];
if (i2==(cn-1)){
    std::cout << "max No.512" <<std::endl;
    continue;
}
tb = cellT[i2] - (wf[i2]*(cellT[i2+1]-cellT[i2])/(wf[i2+1]-wf[i2]));

/*wrap around?*/
if (tb-ta<0 or tb<0 or ta<0){
    std::cout << "wrap-arround? " << tb << " " << ta << " " << tb-ta
<< ", i1= " << i1 << " ,i2= " << i2 <<std::endl;
    return 0;
}

if (tb-ta<Twff-10){
    break;
}

/*correcting value*/
corr = Twff - (tb - ta);
/*skip very large corrections (noise?)*/
if (fabs(corr/Twff) > 0.5){
    std::cout << "too large correction" << ", i1= " << i1 << ", i2 = "
<< i2 <<std::endl;
    return 0;
}

correctedN++;
corr *= damping;
i1 = zeroXing[i]+2;
i2 = zeroXing[i+1];
corr = corr / (i2-i1+1);

/*timing calibration*/
for (j=0,ta=0; j<cn; j++){
    if (j<(cn-1))
        dt = cellT[j+1] - cellT[j];
    else

```



```

    dt = Twff*cn - cellT[j];
    if (i2>i1 && (j>=i1 && j<=i2))
        dt += corr;
    cellT[j] = ta;
    ta += dt;
} //timing cal

/*check and correct for too narrow bin widths*/
for (j=0; j<(cn-1); j++){
    dt = cellT[j+1] - cellT[j];
    if (dt < 1/sf*0.1) {
        corr = 5*(1/sf*0.1-dt);
        for (k=0,ta=0; k<(cn-1); k++){
            if (k<(cn-1))
                dt = cellT[k+1] - cellT[k];
            else
                dt = 1/sf*cn - cellT[k];
            if (k == j)
                dt += corr;
            cellT[k] = ta;
            ta += dt;
        }
    }
} //zeroX & cal
for (i=0; i<cn; i++){
    *pcellT[i] = cellT[i];
}
} //edge
return 1;
}

```

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方のご指導、ご協力をいただきましたことを深く感謝申し上げます。指導教官である片桐秀明准教授には、学部時代の授業から大学院に至るまで、ガンマ線宇宙物理学に関する知識や日々の研究への姿勢について、幅広くご指導ご助言いただきましたこと、深く感謝申し上げます。副指導教官である吉田龍生教授には、同じく宇宙物理に関する知識について長時間の質問にも対応していただき、深く感謝申し上げます。また柳田昭平名誉教授には、ゼミ等においてご指導ご助言をいただきましたこと、感謝申し上げます。

高エネルギー宇宙物理研究室の皆様には、日々の研究の相談や協力をいただきましたことに感謝申し上げます。同期で同じCTAグループのDang Viet Tanさん、本橋大輔さんには、研究会等を通し多々助けていただきました。また、佐藤亘さん、若松諒さんには、実験に関するアドバイス等をいただきました。また天体形成理論グループの菊入勇伸さんにも、解析等について度々議論等させていただきました。先輩である加賀谷美佳さんには、研究の引き継ぎから度々の質問、実験のアドバイスなど、多岐にわたり大変お世話になりました。また、卒業された先輩方、ここには書ききれませんが後輩方にも多くの面で支えていただきました。研究だけでなく、日々の生活から大学のイベントまで、楽しく過ごせたのは皆様のおかげです。

CTA-Japanの皆様、特にSC-CAMグループの皆様には、定期会議や実験の面で、非常に多くのご指導、ご助言をいただきましたことを深く感謝申し上げます。名古屋大学の田島宏康教授、奥村曉助教には、名古屋大学にて行った実験から日々のメールでの質問へのご対応に至るまで、大変お世話になりました。また、同大学のSC-CAMグループの中村裕樹さん、朝野彰さんには、実験面について多々ご協力いただきました。またSLACのTARGET開発グループの皆様にも、メールでの質問に厚く対応いただきました。この場にて心より感謝申し上げます。

最後に、これまで多くの面で支えてくれた家族に、心より感謝申し上げます。

なお本研究は、公益財団法人日本科学協会の、笹川科学研究助成による援助を受けて行ったものです。この場にて感謝申し上げます。(研究番号：28-221)

参考文献

- [1] CTA Japan コンソーシアム. 計画書 2014 年版 (CTA-Japan 編).
- [2] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水元好彦 (2008) 『シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III-高エネルギー天文学』 日本評論社.
- [3] 小山勝二・嶺重慎 (2007) 『シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象』 日本評論社.
- [4] Tonello, N. (2006). "Study of the VHE γ -ray emission from the Active Galactic Nucleus 1ES195+9650". Max-Planck-Institut für Physik
- [5] Poolla V. Ramana Murthy, Arnold W. Wolfendale. (1986). "Cambridge Astrophysics Series 22 Gamma-ray astronomy SECOND EDITION". Cambridge Astrophysics.
- [6] Floyd Eilliam Stecker. (1971). "NASA SP-149 COSMIC GAMMA RAYS". Scientific and technical information office NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION.
- [7] 観山正見・野本憲一・二間瀬敏史 (2008) 『シリーズ現代の天文学 12 天体物理学の基礎 II』 日本評論社.
- [8] Thomas K. Gaisser. 小早川恵三 訳. (1997). 『素粒子と宇宙物理 Cosmic Rays and Particle Physics』. 丸善株式会社.
- [9] T. C. Weeks. (2003). "Very high energy gamma-ray astronomy". Institute of physics.
- [10] Heinrich J. Voelk, Konrad Bernloehr.(2008). "Imaging Very High Energy Gamma-Ray Telescopes", *Astrophysics*, **25**, 173-191.
- [11] Robert Marcus Wagner. (2006). "Measurement of Very High Energy Gamma- Ray Emission from Four Blazars Using the MAGIC Telescope and a Comparative Blazar Study ", PhD thesis, Technische Universität München.
- [12] T. Montaruli, G. Pareschi, T. Greenshaw, et al. (2015). "The small size telescope projects for the Cherenkov Telescope Array", *ICRC2015*, arXiv:1508.05894.
- [13] V. Vassilieva, S. Fegana, P. Brousseau. (2007). "Wide field aplanatic two-mirror telescopes for ground-based gamma-ray astronomy", *Astroparticle Physics*, **28(1)**, 10-27.
- [14] J.J. Watson, A. De Franco, A. Abchiche, et al. (2016). "Inauguration and First Light of the GCT-M Prototype for the Cherenkov Telescope Array", arXiv:1610.01452.
- [15] M. K. DANIEL, R. W. WHITE, D. BERGE, et al. (2013), "A Compact High Energy Camera for the Cherenkov Telescope Array", *ICRC2013*, arXiv:1307.2807.
- [16] 山根暢仁, 田島宏康, 奥村暁ほか. (2016). "次世代チェレンコフ望遠鏡 CTA 計画の小口径望遠鏡カメラに用いる光検出器の選定に向けた SiPM の特性評価", (<http://www.cta-observatory.jp/Publications/Presentations/CTAJ-20160924-01.pdf>)

- [17] 浜松ホトニクス. 光半導体素子ハンドブック／第3章 Si APD、MPPC.
- [18] K. Bechtol, S. Funk, A. Okumura, et al. (2012). "TARGET: A multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes", *Astroparticle Physics*, **36(1)**, 156-165.
- [19] 田島宏康, 奥村暁, 日高直哉ほか. (2015). "CTA 報告 95: CTA 小口径望遠鏡用焦点面検出器の試作器開発", (<http://www.cta-observatory.jp/Publications/Presentations/CTAJ-20150321-10.pdf>)
- [20] L. Tibaldo, J. A. Vandenbroucke, A. M. Albert, et al. (2015). "TARGET: toward a solution for the readout electronics of the Cherenkov Telescope Array", *ICRC2015*, arXiv:1508.06296.
- [21] 河島孝則. (2014). "地上ガンマ線望遠鏡用新型小型カメラに向けた高速高密度の信号処理集積回路のトリガー性能と較正手法の評価", 修士論文, 名古屋大学.
- [22] Behzad Razavi. 黒田忠広 訳. (2003). 『アナログ CMOS 集積回路の設計 応用編』. 丸善出版.
- [23] Bronson Riley Edralin. 2016. "Design and performance of an automated production test system for a 20,000 channel single-photon, sum-nano second electronic readout for a large area muon detector". Thesis. University of Hawaii.
- [24] 遠山健, 大石理子, 大和田英樹ほか. (2010). "大気チェレンコフ望遠鏡用高速サンプリング ASIC アナログメモリーセルの開発". (http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/tyoshiko/pev_explorer/presentations/jps10a_tt.pdf).
- [25] University of Hawaii Manoa Instrumentation Development Laboratory. (2014). "TARGET7 16-channel, GSPS Transient Waveform Recorder with Self-Triggering and Fast, Selective Window Readout". **v.0.947**.
- [26] D.A. Stricker-Shaver, S. Ritt and B.J. Pichler. 2014. "Novel Calibration Method for Switched Capacitor Arrays Enables Time Measurements with Sub-Picosecond Resolution", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **61(3)**, 3607-3617.
- [27] 川崎祥. (2006). "CANGAROO-III 解像型チェレンコフ望遠鏡におけるエネルギー分解能の向上". 修士論文, 東京大学.
- [28] 榎直人, 大石理子, 榎田淳子ほか. (2012). CTA 報告 33: CTA モンテカルロシミュレーション. (<http://www.cta-observatory.jp/Publications/Presentations/CTAJ-20120324-06.pdf>).
- [29] V. Stamatescu, G.P. Rowell, et al. (2011). "Timing analysis techniques at large core distances for multi-TeV gamma ray astronomy". *Astroparticle Physics*, **34(12)**, 886-896.
- [30] Small Size Telescope SST-2M GCT Technical Design Report. (2015). **v.4.2**.
- [31] Francesca Santoro. (2014). "Study and characterization of TARGET-7 chip for a CTA camera". Thesis. University of Bari.

- [32] Albert, A., Funk, S., Kawashima, T., (2016). "TARGET 5: a new multi-channel digitizer with triggering capabilities for gamma-ray atmospheric Cherenkov telescopes". arXiv:1607.02443.
- [33] Stefan Ritt. (2008). "Design and Performance of the 6 GS/s Waveform Digitizing Chip DRS4". (<https://www.psi.ch/drs/DocumentationEN/nss08.ppt>)
- [34] 佐々木美佳. (2011). "次世代ガンマ線天文台 CTA のカメラに用いるアナログメモリ DRS4 チップの特性評価". 修士論文. 茨城大学.
- [35] Brown Anthony M., Armstrong Thomas, Chadwick, Paula M., et al. 2015. "Flasher and muon-based calibration of the GCT telescopes proposed for the Cherenkov Telescope Array". *ICRC2015*, arXiv:1509.00185.
- [36] 山根暢仁, 奥村暁, 佐藤雄太ほか. (2016). "次世代チェレンコフ望遠鏡 CTA 計画の小口径望遠鏡カメラに向けた半導体光電子増倍素子の特性評価". (<http://www.cta-observatory.jp/Publications/Presentations/CTAJ-20160321-01.pdf>)
- [37] J. Vandenbroucke. (2013). "TARGET User Manual". *Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory*