## 修士学位論文

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

2011年度

(平成23年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻 10NM158N 佐々木 美佳

#### 論文要旨

次世代地上チェレンコフ望遠鏡 CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、数 10GeV から 100TeV のエネルギー領域で宇宙からの超高エネルギーガンマ線を測定することを目的とし、建設開始に向けて 準備が進められている。チェレンコフ望遠鏡では、ガンマ線が大気と相互作用した際に生じる高エネル ギー粒子群 (空気シャワー)からの光を反射鏡で集光し、焦点面に置かれた多数の光電子増倍管で構成 されたカメラで撮像する。本研究では、CTA で検出される光電子増倍管からの信号の波形を記録する ために用いられるアナログメモリ ASIC (Application Specific Integrated Circuit)、DRS4 (Domino Ring Sampler) チップの各メモリセルの電圧と時間のキャリブレーションの方法の調査、及びキャリ ブレーションパラメータの温度依存性を評価した。

DRS4 チップはスイスの PSI (Paul Scherrer Institut) で開発された約 5GHz までのサンプリング速 度でサンプリングできるアナログメモリ ASIC であり、信号の幅が数 nsec のチェレンコフ光の信号波 形を記録するのに適している高速の読み出しチップである。また、コンパクト、安価、低消費電力等、 読み出しチップとしての要求仕様を満たしている。そのため、CTA の日本チームが主に開発している 大口径望遠鏡の信号読み出しチップとして採用している。

一つ懸念されるのは、チェレンコフ望遠鏡のカメラは、数千本もの光電子増倍管と、それに伴う回路が密集しているので、かなりの発熱量になるということである。カメラは密封されていて冷却システムにより±1~2 程度を目標に温度制御する予定だが、ある程度の温度勾配は避けられない。そのような温度変化でチップの応答がどのように変化するかを理解し、チップのキャリブレーションを考えなければならない。チップのCTA用のキャリブレーション方法を考えるためには、まずチップの一般的なキャリブレーション方法を把握する必要がある。そこで、開発元のPSIが製作した、チップの特性を知るための最小限の回路だけが付いている評価ボードに付属したライブラリを解読することで、キャリブレーションの方法を調査した。ここで調査したのは、オフセット、ゲイン、タイミングのキャリブレーション方法である。そして、恒温槽を用いて温度を変化させながらパルサーから評価ボードに信号を入力し、キャリブレーションパラメータがどのように変化するかを測定した。この際、キャリブレーションパラメータを読み出すために、ライブラリの拡張を行った。

その結果、各 cell のオフセットの温度変化率は、分散が cell のノイズレベルより小さいため、温度 補正をしなくても観測に影響がないという結果が得られた。また、ゲインの温度による不定性は、ガ ンマ線のエネルギー推定の不定性となり得るが、CTA の要求であるガンマ線のエネルギー分解能に比 ベ無視できる。さらにタイミングについても、波形の時間積分区間の不定性は、波形積分量の不定性、 さらにはガンマ線エネルギーの不定性に影響しうるが、積分区間の時間のずれは非常に小さく、CTA の要求するガンマ線のエネルギーに比べて無視できるという結果が得られた。

これらの結果から、DRS4 チップは、CTA によるガンマ線観測においては温度依存性の影響は無視できるほど小さく、温度依存性を考慮したキャリブレーションは必要ないという結果が得られた。

# 目 次

1	超高	高エネルギーガンマ線天文学	1
	1.1	宇宙線	2
	1.2	高エネルギー粒子の放射機構..................................	3
		1.2.1 <b>対消滅</b> (annihilation)	3
		1.2.2 $\pi^0$ 崩壊 (Neutral pion decay)	4
		1.2.3 制動放射 (Bremsstrahlung)	4
		1.2.4 シンクロトロン放射 (Synchrotron Emission)	5
		1.2.5 逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering)	5
<b>2</b>	解像	型大気チェレンコフ望遠鏡	6
	2.1	空気シャワー	6
	2.2	チェレンコフ光	8
	2.3	イメージングチェレンコフ技術	10
3	СТ	A(Cherencov Telescope Array)	12
	3.1	· 、 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	12
	3.2		13
	3.3	CTA の性能	13
	3.4	望遠鏡	17
		3.4.1 <b>大口径望遠鏡</b>	17
		3.4.2 中口径望遠鏡	18
		3.4.3 小口径望遠鏡	19
		3.4.4 望遠鏡配置	20
	3.5	ミラー	21
	3.6	光検出器モジュール	22
	3.7	エレクトロニクス....................................	25
	3.8	トリガー・データ転送	27
	3.9	DRS ボード開発	28
4	DR	LS4 チップ	31
	4.1	DRS4 <b>チップの仕様および動作原理</b>	32
	4.2	DRS4 評価ボード (DRS4 Evaluation Board V3)	34
	4.3	DRS4 評価ボードライブラリの概要	35
<b>5</b>	DR	LS4 評価ボードライブラリの解析およびライブラリの拡張	36
	5.1	解析方法	36
		5.1.1 オフセットキャリブレーションの解析方法	36
		5.1.2 ゲインキャリブレーションの解析方法	38

		5.1.3	タイミング	ブキャリフ	ブレーシ	ョンの解	析方法	•••			 	 		39
6	DR	.S4 評個	<b>西ボードに</b> ま	らける DF	<b>₹S4</b> チッ	プ特性部	平価							46
	6.1	温度特	性評価実験	の実験方	法						 	 		46
	6.2	解析方	ī法....								 	 		48
		6.2.1	オフセッ	トキャリス	ブレーシ	ョンの解	析方法と	と結果			 	 		48
		6.2.2	ゲインキ・	ァリブレ-	-ション	の解析方	法と結算	₹			 	 		52
		6.2.3	タイミング	ブキャリス	ブレーシ	ョンの解	析方法と	と結果			 	 		58
	6.3	議論						•••			 	 		64
7	まと	め												67
付約	付録 A 本文中で使用した関数群										68			
付録 B 追加した関数群									69					
付鍋	付録 C 測定に使用する目的で作成したプログラム									70				

## 図目次

1	現在稼働中の超高エネルギーガンマ線望遠鏡群................	1
2	宇宙線のエネルギースペクトル.................................	2
3	ガンマ線の放射機構	3
4	空気シャワーの模式図	$\overline{7}$
5	電磁シャワーの模式図	8
6	チェレンコフ光	9
7	空気シャワーとカメライメージ	9
8	シャワーイメージ	10
9	シャワーの到来方向	11
10	Kifune Plot	12
11	タイムスケジュール	13
12	CTA 目標感度曲線	14
13	遠方ガンマ線天体....................................	14
14	銀河座標における高エネルギーガンマ線の全天マップ	15
15	大口径望遠鏡	17
16	中口径望遠鏡	18
17	小口径望遠鏡	19
18	MC シミュレーションによるアレイ配置	20
19	CTA 望遠鏡配置予想図	20
20	Cold-Slump <b>法の概念図</b>	21
21	ミラー外形	22
22	光検出器モジュール	23
23	浜松ホトニクス社製 R11920-100 光電子増倍管	24
24	チェレンコフ光のスペクトルと R11920-100 の量子効率	24
25	ライトガイド	25
26	flash ADC 方式	26
27	アナログメモリサンプリング方式	27
28	DRS ボード	28
29	DRS <b>ボードブロック</b> 図...................................	28
30	光電子増倍管 + Cockcroft-Wolton 回路 + プリアンプ.............	29
31	スローコントロールボード...................................	29
32	フロントエンドカード	30
33	トリガー回路	30
34	DRS4 チップ (1)	31
35	DRS4 チップ (2)	31
36	DRS4 チップ (3)	32
37	Domino wave 回路	33

38	DRS4 評価ボード	34
39	DRS4 評価ボードにおける電圧測定可能範囲	36
40	実測によるオフセットと cell 番号の関係, データシートによるオフセットと時間の関係	37
41	実測によるゲインと cell 番号の関係, データシートによる入力電圧と出力電圧の関係 .	38
42	タイミングキャリブレーションのイメージ	39
43	タイミングの解析方法	40
44	波高値を用いたタイミングの補正方法.................................	41
45	実測によるタイミングの積算値と cell 番号の関係	45
46	実験セットアップ全体....................................	47
47	評価ボード内の温度と経過時間の関係..............................	48
48	10~25 番目の cell のオフセットパラメータと温度の相関	50
49	各 cell のオフセットの温度変化率	51
50	DRS4 評価ボードの出力波形	52
51	矩形波のイメージ....................................	53
52	20 , 10~25 番目の cell の入力電圧と出力電圧の相関	54
53	10~25 番目の cell のゲインパラメータと温度の相関	56
54	9~1014 番目の cell のゲインの温度変化率	57
55	周波数ごとの各 cell のタイミングのパラメータの積算値...........	58
56	温度ごとの各 cell のタイミングパラメータの積算値 ..............	59
57	ランダムに選んだ cell のタイミングパラメータの積算値と温度の相関	61
58	各 cell の 2 回の測定によるタイミングパラメータの積算値の差	62
59	各 cell のタイミングパラメータの積算値の温度依存性 ...............	63
60	オフセットの解析の概念図 (各 cell の分散が小さい場合)	65
61	オフセットの解析の概念図 (各 cell の分散が大きい場合)	65
62	ゲインの変化による信号の積分値の変化	65
63	タイミングの変化による信号の積分値の変化............................	66

### 1 超高エネルギーガンマ線天文学

およそ 10keV を越える高エネルギーの光子、すなわち最も波長の短い光はガンマ線と呼ばれる。ガ ンマ線の範囲は幅広く、TeV (= 10<sup>12</sup>eV) という超高エネルギー領域にまで及ぶ。ガンマ線天文学は X 線天文学よりも長い歴史を持つにも関わらず、観測の難しさから進歩が遅れていた。ガンマ線はエ ネルギーが高いので光子数が減るため、小さな検出器では観測が難しいためである。また、地球大気 による吸収のため、地上での直接検出が不可能であることなどが原因である。1967年に、OSO-3 衛星 によりガンマ線が初めて確実に捉らえられた。その後も進歩を続け、1989年にヨーロッパの Granat 衛星が打ち上げられたのをきっかけに目覚しい進歩が見られるようになった。2008年には Fermi 衛星 という、GeV 領域では決定版とも言えるような衛星が打ち上げられ、現在も観測が続けられている。

超高エネルギーガンマ線 (TeV ガンマ線)の観測は、地上の望遠鏡によって行われる。高エネルギー 宇宙線が大気に入射し、大気の原子核と衝突して生じる2次粒子が繰り返し衝突し、粒子数を増加さ せて地上に降り注ぐ現象を空気シャワーという。この際、チェレンコフ光という青い光が放射される。 このチェレンコフ光の観測を行うことでガンマ線源を特定する望遠鏡を、地上チェレンコフ望遠鏡と いう。地上チェレンコフ望遠鏡による観測は、1989 年にアメリカの Whipple 望遠鏡により、かに星雲 から TeV ガンマ線が検出されたのがはじまりである。ドイツなどの H.E.S.S や MAGIC、アメリカな どの VERITAS が現在チェレンコフ望遠鏡として稼働中である。現在発見された TeV ガンマ線天体の 数は数百以上にもなる [15]。



図 1: 現在稼働中の超高エネルギーガンマ線望遠鏡群 (上から、MAGIC [3]、VERITAS [4]、H.E.S.S. [2])

#### 1.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間を飛び回る高エネルギー粒子で、その主成分は陽子であり、微量ではあるが電子や陽電子、反陽子、さらにニュートリノも含まれている。宇宙線のエネルギー分布は、10<sup>8</sup>eV~10<sup>20</sup>eV という12桁の幅広い領域である。そしてそのエネルギースペクトルは、図2のような折れ曲がり(Knee, Ankle)のあるべき関数で表される。

宇宙線がどこで生成され、どのようなメカニズムで 10<sup>20</sup>eV という高エネルギーまで加速されているのか、研究が進められている。高エネルギー領域では宇宙線の到来頻度 (flux) が減少するため、エネルギーの大きさによって様々な検出器や観測手段がとられている。

宇宙線は荷電粒子で宇宙空間の磁場の影響を受けるので、直接その到来方向を特定することができない。そのため、高エネルギー粒子から放射されるガンマ線を観測する。ガンマ線は電荷を持たないため、ガンマ線を観測することで、宇宙線起源や加速機構を特定できる。



図 2: 宇宙線のエネルギースペクトル [8]

#### 1.2 高エネルギー粒子の放射機構

図3は、高エネルギー粒子の放射機構を示している。これらの放射機構について以下で述べる。



図 3: a) 対消滅 b)  $\pi^0$  崩壊 c) 制動放射 d) シンクロトロン放射 e) 逆コンプトン散乱 [24]

#### 1.2.1 対消滅 (annihilation)

粒子と反粒子が衝突すると、これらがはじめに持っていたエネルギーは光子の運動エネルギーに変換され、ガンマ線やπ中間子が生成される。電子-陽電子の場合

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma \tag{1}$$

という反応が起き、2個の光子 (ガンマ線)が生成される。電子、陽電子の静止状態エネルギーは、 $m_ec^2=511$ keV である。活動銀河核からのジェット内で相対論的に加速された電子-陽電子の対消滅によるガンマ線は、MeV 領域に幅広い連続スペクトルとして現れる。対消滅して生成されたガンマ線のエネルギーが十分に高ければ、 $\pi$ 中間子などが生成され、次節で述べる  $\pi^0$  崩壊でさらにガンマ線が放射される。

**1.2.2**  $\pi^0$  崩壊 (Neutral pion decay)

陽子同士の衝突や、陽子と光子の衝突により、 $\pi$ 中間子が生成され、 $\pi^0$ の崩壊により、ガンマ線が 放射される。 $\pi$ 中間子には $\pi^0 \ge \pi^+, \pi^-$ があり、 $\pi^0$ は2つの光子に崩壊する (式 (2))。

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma \tag{2}$$

また、 $\pi^+$ と $\pi^-$ は、ミューオンとニュートリノに崩壊する。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \tag{3}$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \tag{4}$$

宇宙空間では、高エネルギー陽子が星間物質中のガスと衝突して <sup>10</sup> が崩壊する。例えば、

$$p_{(\text{stark})} + p_{(\text{gling})} \longrightarrow p + p + \pi^0 \tag{5}$$

という過程で、 $\pi^0$ が作られる。陽子と $\pi$ 中間子の質量を $m_{\rm p}, m_{\pi}$ としたとき、宇宙線陽子の運動エネルギー $E_{\rm p}$ は、

$$E_{\rm p} - m_{\rm p}c^2 \ge 2m_{\pi^0}c^2 \left(1 + \frac{m_{\pi^0}}{4m_{\rm p}}\right) = 280[{\rm MeV}]$$
 (6)

という条件を満たさなければならない。ここで、 $\pi$ 中間子の静止エネルギーは  $2m_{\pi^0}c^2=135$ MeV で、 生成された  $\pi^0$  中間子の平均寿命は  $8.4 \times 10^{-17}$  秒である [14] [16]。

#### 1.2.3 制動放射 (Bremsstrahlung)

荷電粒子が電場によって減速されたり進路を曲げられたりした際に発生する電磁波放射のことを制動放射という。宇宙線電子が原子核の近くを通過するとき、核のクーロン力によって進路を曲げられ、加速度運動を行って制動放射を生ずる。電子の放射のエネルギーがE、放射される電磁波の周波数を $\nu$ としたとき、その放射スペクトルは $0 < \nu < E/h(h$ はプランク定数)において連続的に分布する。放射確率は加速度の2乗に比例するため、電子の質量の2乗に反比例する。したがって、電子やミューオンのような軽い粒子による制動放射が起こりやすい。ここで、周りの物質が完全に遮蔽された状態にある場合、原子核の原子番号をZ、数密度を $Nm^{-3}$ 、微細構造定数 $\alpha$ (=1/137.036)、トムソン散乱断面積 $\sigma_{\rm T}$ (= 0.665×10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>)のとき、相対論的電子のエネルギー変化率は、

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\rm Brems} = \frac{3}{2\pi}\sigma_{\rm T}c\alpha Z(Z+1)N[\ln\gamma + 0.36]E\tag{7}$$

#### と表される。

式 (7) は電磁波の放射率を表し、その放射率は数密度 N に比例していることがわかる。銀河系中心のような高密度の領域で広がったガンマ線源が観測されている。このガンマ線源はおよそ数十  $MeV \sim$ 数 GeV の範囲で観測されており、宇宙線電子が星間物質の中で起こす制動放射は、この低エネルギー 側 (数百 MeV 以下)で主に起こっている。また、それより高エネルギー側は、 $\pi^0$  崩壊が主なガンマ線の起源となっている [14]。

1.2.4 シンクロトロン放射 (Synchrotron Emission)

相対論的な荷電粒子が磁場中を通過するとき、荷電粒子はローレンツ力により加速度を受け、電磁 波を放射する。この放射をシンクロトロン放射という。一つの電子がシンクロトロン放射で放射する パワーは、

$$P_{\rm syn} = \frac{4}{3}\sigma_{\rm T} c\gamma^2 \beta^2 U_B \tag{8}$$

と表される。ここで、 $\sigma_{\rm T}$ ,  $U_B(=\frac{B^2}{8\pi})$ ,  $\gamma$ ,  $\beta = v/c$  は、それぞれトムソン散乱断面積、磁場のエネル ギー密度 (ただし、B は磁場の強さ)、電子のローレンツ因子、電子の速度を表している。また、相対 論的電子のエネルギースペクトルがべき指数 p と光速の比のべき型スペクトルであるとすると、これ らの電子がシンクロトロン放射によって放出する光子のエネルギースペクトルは、べき指数 (p-1)/2のべき型スペクトルになる。フェルミ加速においては、加速された粒子の分布はべき指数  $p\simeq 2$  のべき 型スペクトルになる。実際、多くのシェル型超新星残骸から観測されている非熱的電波スペクトルの べき指数は 0.5 に近い値を示しているので、このことは残骸におけるフェルミ加速の観測的証拠となっ ている。また、電子によって放射される典型的な光子エネルギー  $E_{\rm syn}$  は、

$$E_{\rm syn} = 2\left(\frac{B}{10[\mu \rm Gauss]}\right) \left(\frac{E_{\rm e}}{100[\rm TeV]}\right) \sin\theta[\rm keV] \tag{9}$$

と表される。ここで、 $E_{e}$ は電子のエネルギー、 $\theta$ は電子の進行方向と磁力線とのなす角である [26]。

#### 1.2.5 逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering)

相対論的電子が周囲の低エネルギー光子を散乱し、高エネルギーにたたき上げることを逆コンプトン散乱という。逆コンプトン散乱によって電子から光子に変換されるパワー P<sub>IC</sub> は、

$$P_{\rm IC} = \frac{4}{3} \sigma_{\rm T} c \gamma^2 \beta^2 U_{\rm ph} \tag{10}$$

と表される。ここで、 $\sigma_{\rm T}$ ,  $U_{\rm ph}$ ,  $\gamma$ ,  $\beta = v/c$  はそれぞれトムソン散乱断面積、輻射場のエネルギー密度、 電子のローレンツ因子、電子の速度である。また逆コンプトン散乱による一回の散乱後の光子のエネ ルギー *E* は、

$$E \sim \gamma^2 E_0 \qquad (\gamma E_0 \ll m_{\rm e} c^2) \tag{11}$$

$$E \sim \gamma m_{\rm e} c^2 \qquad (\gamma E_0 \gg m_{\rm e} c^2) \tag{12}$$

と表される。ここで、 $E_0$ ,  $m_e$ ,  $\gamma$  はそれぞれ散乱前の光子のエネルギー、電子の静止質量、電子の ローレンツ因子である。散乱される光子が 2.7K 宇宙背景放射の光子である場合、 $E_0 = 2.64 \times 10^{-4} \text{eV}$ より、 $\gamma E_0 \ll m_e c^2$ を満たす電子のエネルギー範囲は  $\leq 1000 \text{TeV}$  である。また、100 TeV の電子が 2.7K 宇宙背景放射を逆コンプトン散乱によってたたき上げた場合、式 (11) よりおよそ 1 TeV のエネルギー のガンマ線が生成されることが分かる [26]。

#### 2 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

ガンマ線は主に衛星による観測と、地上でのチェレンコフ望遠鏡による観測が行われている。100GeV を超えるエネルギーのガンマ線は、光子数が少ないため衛星のような有効面積の小さな検出器による 観測は不可能である。そのため、エネルギーの高いガンマ線の観測は解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT: Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) によって行われる。ガンマ線は地球大気により 地上には到達しないため、直接検出することは不可能である。しかし、チェレンコフ光を用いて間接 的にガンマ線を観測することで、超高エネルギー領域のガンマ線の観測が進められている。

#### 2.1 空気シャワー

地球外からやってきた高エネルギーの宇宙線は、大気を通過する間に大気の原子核と衝突し、2次粒 子を生成させる。衝突によって生成された2次粒子はさらに空気を構成する原子核と衝突し、次々に 粒子数を増やしながら地表に向かう。このような現象は空気シャワー(EAS: Extensive Air Shower) と呼ばれる(図4)。ガンマ線による空気シャワーは、電磁カスケードによって形成される(図5)。入射 したガンマ線は電子対生成を最初に起こし、さらに生成された電子が制動放射によりガンマ線を生成 する。この現象を繰り返し、シャワーが発達していく。

空気シャワーが持つ粒子数、空間的な広がりは、大気に入射した宇宙線粒子の組成、エネルギーに 関係する。



図 4: 空気シャワーの模式図 [22]



図 5: 電磁シャワーの模式図 [26]

2.2 チェレンコフ光

光速を超える荷電粒子が物質中を通過するときに、通過する荷電粒子が作る電磁場の作用で物質か ら青い電磁波、チェレンコフ光が放射される(図6)。

屈折率 n の媒質中では光速が、

$$c' = \frac{c}{n} \tag{13}$$

となる (*c* は真空中の光の速度)。この媒質中において高速の荷電粒子が *c'* より速く媒質中を進むとき、 つまり

$$v > \frac{c}{n} \tag{14}$$

の条件が満たされるとき、チェレンコフ光が観測される。このとき、荷電粒子周囲の電磁場が波面が 重なって衝撃波が生じる。放出される角度は、衝撃波の波面が荷電粒子の進行方向となす角をθとす ると、

$$\cos\theta = \frac{c}{n} \tag{15}$$

となる。大気の屈折率は $n \approx 1.0003$ (地上付近)なので、 $\theta \simeq 1^{\circ}$ となる。したがって、チェレンコフ光 は荷電粒子とほぼ同じ方向に放射される。このことから、チェレンコフ光を観測することで、もとの 粒子の到来方向を特定できるということがわかる [4]。



図 6: チェレンコフ光 [1]

空気シャワーから放射されるチェレンコフ光の分布は、シャワーの発達の仕方や、空気の屈折率、そして地上の光子の分布で決まる。light poolの半径を $r_c$ とすると、 $r_c$ はシャワーの最大発達点と、チェレンコフ角 $\theta_c$ により

$$r_c = (\mathbf{i} + \mathbf{v} - \mathbf{v} - \mathbf{o})$$
最大発達高度) ×  $\theta_c$  (16)

と決められる (図7) [26]。



図 7: 空気シャワーとカメライメージ [27]

### 2.3 イメージングチェレンコフ技術

地上チェレンコフ望遠鏡では、地上に設置された望遠鏡群で空気シャワーが起こった際に放射され るチェレンコフ光を観測する。チェレンコフ光の波長分布は、 $1/\lambda^2$ に比例するスペクトル分布を持つ。 波長 300nm 以下は大気中で吸収され、300nm から 600nm の間に放射されたチェレンコフ光の検出が 重要である。

1TeV のガンマ線からのシャワーからは最大でおよそ 1000 個の電子、陽電子を作る。これらのチェ レンコフ光は地上で直径 300m 程度の light pool として広がる。 light pool 内での光の分布はほぼー 様で 300-600nm の波長域で単位面積当たり ~50 photons/m<sup>2</sup> となる。



図 8: シャワーイメージ [9]

イメージングチェレンコフ望遠鏡では、ガンマ線シャワーのチェレンコフ光イメージが楕円形状に 捉えることができる。複数台の望遠鏡で同時にシャワーの観測を行うことで、ガンマ線の到来方向を 決定する。

その手法として、4台の望遠鏡を用いた場合を考える(図9)。それぞれのチェレンコフ光イメージを 楕円近似し、それぞれの楕円の長軸をのばす。その交点がガンマ線の到来方向と推測される。



図 9: シャワーの到来方向 [9]

## 3 CTA(Cherencov Telescope Array)

#### 3.1 概要

現在稼動中の地上チェレンコフ望遠鏡、H.E.S.S., MAGIC, VERITAS に続き、TeV 領域での観測 を飛躍的に向上させるために、CTA (Cherencov Telescope Array) 計画という実験計画が持ち上がっ た。CTA は現在稼動中の地上チェレンコフ望遠鏡よりも一桁感度を向上させ、観測可能なエネルギー 領域を 10GeV-100TeV に拡げることを目的とした、25 カ国参加の国際共同実験計画である。実現す れば、1000 を超えるガンマ線天体の発見が期待される (図 10)。



☑ 10: Kifune Plot [9]

CTA の議論は 2005 年の ESFRI(European Science Forum for Resarch Infrastructure、EU の大型 研究施設を検討する Committee) へ、H.E.S.S., MAGIC collaboration から、次世代チェレンコフ望遠 鏡施設の Proposal を提出したことにより始まった。2007 年よりデザインスタディーを開始し、2010 年に完了した。現在は各望遠鏡のプロトタイプ、建設開始に向けての準備研究段階であり、2015 年に は本格的建設が開始される予定である。そして、2020 年には建設を終え、2017 年 ~2020 年に部分的 観測を開始し、2020 年 ~2040 年にフル観測運転を行う予定である [9]。

	06	07	08	09	10	11	12	13	14
Array layout									
Telescope design			De	sio.					
Component prototypes				an					
Telescope prototype					PI	ototype			
Array construction								Arra	av
Partial operation									,

図 11: タイムスケジュール [9]

#### 3.2 CTA-Japan について

CTA-Japan は約80人の組織で構成され、様々な大学や研究機関が関わっている。日本がCTA 計画 という重要なプロジェクトに参加するため、宇宙線やガンマ線、X線、そして理論のコミュニティを 中心に広く呼びかけ、CTA-Japan Consortium を結成し、正式にCTA に日本グループとして参加す るに至った。CTA-Japan のメンバーは、X線衛星すざく、Astro-H、ガンマ線衛星 Fermiの主要研究 者も複数関わっており、他波長のデータとCTA のデータを合わせて高エネルギー宇宙物理を展開する ことが可能となる。また、多くの若手理論家もメンバーに加わり、観測と理論の両面からサイエンス を推進できる。CTA-Japan は、最終的には人的貢献や実験装置開発、予算規模、サイエンス推進など のすべての面で、全体の約20%の貢献を目指している[9][17]。

#### 3.3 CTA の性能

以下で CTA の性能について述べる [9]。

感度

CTA ではすべてのエネルギー領域において、現在稼動中の望遠鏡よりも 10 倍の感度の向上を持 つ。エネルギー領域 300GeV-3TeV では 50 時間の観測により、1mCrab[10<sup>-14</sup>erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>] の 感度を達成する (図 12)。



図 12: CTA 目標感度曲線 [9]

#### • 観測可能なエネルギー領域

CTA では、20-30GeV から 100TeV の広いエネルギー領域での観測を行う。この領域では、宇宙背景光 (EBL: Extragalactic Background Light) のフォトンとガンマ線の衝突エネルギーが小さく、EBL によるガンマ線の吸収が無視できるほど小さいため、この低い閾値により、z~4程度までの活動銀河核、ガンマ線バーストの観測が可能である (図 13)。観測エネルギーの上限 (100TeV) に関しては、ガンマ線の Mean free path が 100TeV で銀河内の長さであるため、我々の銀河内にあるエネルギー  $10^{15}$ eV の宇宙線起源天体 (Pevatron) を同定することが可能となる。



図 13: 遠方ガンマ線天体 [9]

#### • 全天観測

CTA は全天観測を行うため、北半球と南半球の2箇所にステーションを建設する。銀河面の広い 範囲の観測が可能な南半球のステーションでは、20-30GeV~100TeVのエネルギー領域を覆うこ とが必要である。北半球のステーションでは、銀河面の観測が限られるため、20-30GeV~10TeV の南半球のステーションよりも低いエネルギー領域を覆うことが必要である。

図 14 は、解像型チェレンコフ望遠鏡によって得られた TeV ガンマ線天源の銀河座標系でのプロットである。薄く塗りつぶされた領域は、南半球から観測できる領域を示している。銀河中心近くでは、超新星残骸やパルサー星雲などの天体が多数見つかっており、CTA での観測により、TeV ガンマ線源天体の特定に繋がる発見ができると期待されている。



図 14: 銀河座標における高エネルギーガンマ線の全天マップ [23]

• 角度分解能

現在稼動中の望遠鏡では角度分解能は約0.1度(6分角)である。これらの望遠鏡は2台~4台の 望遠鏡群であるのに対し、CTAでは約60台という今までより多くの望遠鏡を配置することで一 つのガンマ線シャワーを複数台で観測でき、1-2分角というより高い角度分解能を達成する。

• 時間分解能

CTA は、活動銀河核 Mrk501、PKS2155 のような早い時間変動を持つフレアーに対して、CTA は広い検出面積で高感度であるため、~10 秒程度の時間スケールまで調べることができる。

#### • 観測モードの自由度

CTA は約60台の望遠鏡から構成される。望遠鏡の観測モードとして、全望遠鏡で同方向を観測 するディープフィールドモードや、4台程度で広い視野をみるサーベイモード、また、複数の天 体を複数の望遠鏡で独立にモニターするモニターモードがあり、それぞれ異なるモードで観測す ることが可能である。これらの様々なモードによって、特定の天体の詳細な観測や、銀河面サー ベイ、全天サーベイなど、それぞれに最適な観測を可能になる。

#### サーベイ能力

 $10 m Crab [10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1}]$ の感度で全天サーベイが約1年 (1000 時間) で可能となる。初めて TeV ガンマ線の空をノンバイアスでスキャンし、現在の H.E.S.S., MAGIC の感度で全天図を作 成できる。未発見の天体、他波長では見ることができない天体を多数発見できる可能性がある。

#### • 期待される天体数

銀河内において、超新星残骸、パルサー星雲、パルサー、連星系システム、分子雲などが 300-400 程度観測されると予想される。また、銀河外においては、活動銀河核が 500-600 程度の観測が見 込まれる。さらに、Fermi 衛星の観測を外挿すると、年間数例程度のガンマ線バーストが観測さ れると予想される。

#### 3.4 望遠鏡

CTA は、大口径望遠鏡 (口径 ~24m)、中口径望遠鏡 (口径 ~12m)、小口径望遠鏡 (口径 ~7m) の三 種類の大きさの望遠鏡群で観測を行う。ガンマ線シャワーからのチェレンコフ光の光量は、ガンマ線 のエネルギーにほぼ比例するので、大口径望遠鏡では低エネルギー側の、小口径望遠鏡では高エネル ギー側のガンマ線を観測する。また、ガンマ線のエネルギーが高くなるにつれ、その到来頻度はべき 関数で減少する。そのため、低エネルギーのガンマ線の観測は少数の大口径望遠鏡で行い、高エネル ギーのガンマ線の観測は、多数の望遠鏡で広い面積を覆う。

#### 3.4.1 大口径望遠鏡

大口径望遠鏡 (LST: Large Size Telescope) は、 20-30GeV から 1000GeV の低エネルギー領域の観 測を行う。鏡の総面積は 400m<sup>2</sup> 以上で、高反射率、 高集光率、高光検出効率であることが要求される。 また、夜光の影響を減らすため、高速のエレクトロ ニクスによってチェレンコフ光イメージの積分時間 を最小化する必要がある。さらに、集光された光の 同時性を確保するため、鏡面全体としては放物面 鏡の構造である。夜光は開口部が 50mm の直径の Winston cone を取り付けた光電子増倍管の場合、 場所や観測条件にも依るがおよそ300MHzになる。 有効積分時間 4nsec 程度のデジタルフィルターを用 いれば、夜光による平均ノイズは1.2p.e. 程度にお さえることができるので、エネルギー閾値を下げる ことで、より低エネルギーの光を観測することがで きる (図 15)[9]。



図 15: 大口径望遠鏡 [9]

#### 3.4.2 中口径望遠鏡

中口径望遠鏡 (MST: Middle Size Telescope) は、100GeV から 10TeV のエネルギー領域の観測を 行う。鏡の総面積は100m<sup>2</sup> 程度で、現在稼動中の H.E.S.S. や VERITAS と同じサイズである。20-30 台の中口径望遠鏡で、1mCrab の感度を達成する。銀河面スキャン、全天スキャンを行うため、視野 をできるだけ広くし、一様なイメージが得られるデザインとなっている。同時に光が入射したとき、 FWHM で 4nsec の時間広がりを持ち、F/D=1.3, FOV=8 °となっている (図 16)[9]。



図 16: 中口径望遠鏡 [9]

#### 3.4.3 小口径望遠鏡

小口径望遠鏡 (SST: Small Size Telescope) は、1TeV から 100TeV の高エネルギー領域の観測を行い、最高エネルギー領域のガンマ線の検出を目的とする。小口径望遠鏡は、銀河面がより広く観測で きる南ステーションのみに設置予定である (図 17) [9]。



図 17: 小口径望遠鏡 [9]

#### 3.4.4 望遠鏡配置

MCシミュレーションにより、大、中、小のサイズの望遠鏡を、限られた予算内でそれぞれどのように 配置するのが最適であるかが検討されている。Super Configration という 275 台の望遠鏡を 3km×3km のエリアに展開した仮想的なアレイ上に、大量のガンマ線、宇宙線バックグラウンドの疑似シャワー、 チェレンコフイベントを生成し、20 程度のサブアレイで性能評価を行った。コストモデルに従ってシ ミュレーションを行った結果、Configration E において広いエネルギー領域で CTA の目標感度を達成 できることがわかった (図 18(右))。この configration では直径 2km のエリアに大口径望遠鏡 4 台、中 口径望遠鏡 23 台、小口径望遠鏡 32 台が配置されている [9]。



図 18: MC シミュレーションの生成されたアレイ Super Configration(左), コストー定の条件で最適化 されたアレイ Configration E(右) [9]

図 19 は MC シミュレーションに基づいた CTA 望遠鏡の配置予想図である。



図 19: CTA 望遠鏡配置予想図 [6] [9]

#### 3.5 ミラー

以降、CTA-Japanが開発の焦点に当てている、大口径望遠鏡について述べる。日本の宇宙線グルー プでは、テレスコープアレイで大型のミラーを製作した経験と実績がある。また、大型 LED ディスプ レイ焼き付け工程に必要とされる、3m サイズまでの大型反射鏡を製作できる三光精衡所という会社 が国内に存在する。そのため、CTA-Japan では大口径望遠鏡に焦点を当てて開発を行っている。

CTA では、大口径望遠鏡において対辺 1.5m 六角形、曲率半径 55.2m 分割鏡が約 200 枚必要である (図 21)。これらの大量のミラーを経済的に製造するための様々な技術提案、試験が行われている。ま た、高い反射率や角度分解能、さらに軽量であることなどが要求される。さらに、長期に渡って高精 度の観測を続けるため、反射鏡の劣化を少なくすることが必要である。

大口径望遠鏡のミラーの要求仕様は以下の通りである。

- 外形 対辺 1.5m の六角形
- 焦点距離 27.6m
- 曲率半径 55.2m
- スポットサイズ 外気温によらず 10mm 以下
- 反射率 紫外線領域で 90% 以上
- 反射率経年変化 2%以下
- 重量 1 枚あたり 50kg 以下
- 耐久性
   雨と埃に曝された状態で10年以上

これらの要求仕様を満たすため、現在、三光精衡所によって Cold Slump 法という技術により、鏡の試作を行っている (図 20)。

現在開発中の鏡は、アルミハニカムに曲率を持たせた厚さ 3mmのガラスを張り付け、そのガラス上にアルミとSiO2を含 む多層の薄膜コーティングを行っている。この方法により、す でに95%の反射率を持った鏡の試作に成功している[9][20]。



図 20: Cold-Slump 法の概念図 [9]



図 21: ミラー外形 [9]

3.6 光検出器モジュール

解像型チェレンコフ望遠鏡は、反射鏡によって集光されたチェレンコフ光をカメラで撮像するもの である (図 22)。CTA 望遠鏡には高反射率のフィルムによるライトガイドを搭載し、チェレンコフ光 を集光する。そしてカメラは光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube) による検出器を主候補とし て開発が進められ、そこで使用される光電子増倍管の総数は、10万本にも及ぶ。大口径望遠鏡では1 台につき約 2500本の光電子増倍管が使用される。CTA で搭載される光電子増倍管の要求仕様は以下 の通りである。

• カメラピクセルサイズ	0.1 <b>度</b> , 50mm
• 光電子増倍管外形 (光電面直径)	1.5 インチ (34mm)
<ul> <li> 窓形状</li> </ul>	convex/concave/hemispherical
• 有感波長領域	300-600nm
• 感度	ピーク量子効率 35% 以上
• ダイナミックレンジ	1 光電子識別可~3000p.e. 以上
• アフターパルス	2×10 <sup>-4</sup> 以下
• 時間分解能	1.3nsec 以下 (TTS, 1p.e.)
● パルス幅	$2.5 \sim 3 \operatorname{nsec}(FWHM)$

• 寿命

10年間でゲイン低下 20% 以下

標準動作ゲイン ~4×10<sup>4</sup>

これらの要求を満たし、なお且つ10万本もの光電子増倍管をCTA 建設期間中に納品が可能な企業は、世界でも浜松ホトニクス社か、Electron Tube 社に限られる。

現在、CTA での要求値を満たす仕様の光電子増倍管の候補として、浜松ホトニクス社の1.5 インチ 光電子増倍管 R11920-100(図 23, 24) が採用されていて、これを用いた試験が進められている。



図 22: 光検出器モジュール [9]



図 23: 浜松ホトニクス社製 光電子増倍管 [13]



図 24: チェレンコフ光のスペクトルと R11920-100 の量子効率 [10]

1.5 インチ光電子増倍管による焦点面カメラにおいて は、短波長領域まで集光可能な高反射率のフィルムによ るライトガイドを入射側に搭載し(図25)、デッドスペー スを減らすことにより、効率良くチェレンコフ光を吸収 する。

また、CTA では、「クラスタ」という7本に束ねられ た光電子増倍管と、高圧ブリーダー(HV)、高速プリアン プ、読み出し回路、制御・モニターエレクトロニクスが一 体になって構成された光検出器モジュールの開発を行っ ている。2012年4月にあるカメラ会議で海外のグループ に日本の成果を示すため、CTA-Japanのカメラ採用に向 けて試験を進めている。



図 25: ライトガイド [9]

#### 3.7 エレクトロニクス

大気チェレンコフ望遠鏡が空気シャワーを捉えた時、光センサーから出力されるチェレンコフ光の 信号の幅は短くて数ナノ秒であるので、固定時間幅で積分した電荷量の測定のみでは数十~数百 MHz でランダムに発生する夜光を効率的に除去できない。従って、毎秒数百 MHz~数 GHz の高速でサン プリングした波形をそのまま記録する必要がある。さらに、この波形情報を読み出すためのトリガー は、生成するのに一つの望遠鏡内で 0.1~数 µ 秒かかる。しかし、一つの望遠鏡で波形を記録した後、 望遠鏡アレイ間のトリガーを合わせるために長距離間で数 µ 秒程度が必要であり、その間波形情報を 保持しなければならない。また、CTA では 1p.e.~3000p.e.の広いダイナミックレンジを持つ回路が要 求される。これらの要求仕様を満たす回路として、現在稼動中の望遠鏡で使用実績がある二つの波形 サンプリング方式 (flash ADC 方式、アナログメモリサンプリング方式) をベースに開発が進められて いる。以下ではこの二つの波形サンプリング方式について述べる [9]。

#### • flash ADC 方式

光センサーからの波形を毎秒数百 MHz~数 GHz のサンプリング速度で、flash ADC を用いて AD 変換 (アナログデジタル変換) し、リングバッファメモリ (数十μ秒長) に記録する方式であ る。この方式は長距離の望遠鏡アレイ間のトリガー遅れに対応できるという利点がある。けれ ども、flash ADC のダイナミックレンジは典型的に 8-10 ビットであるため、2 種類の増幅率を 持つ並列変換、もしくは増幅切り替えが必要となる。また、高速の波形サンプリング、読み出し であるため、リングバッファに記録された ADC からチェレンコフ光の信号を選別することが可 能であるが、コストや消費電力が増えるという問題点がある。そのため、カメラ内の発熱を考慮 し、望遠鏡の口径などを視野に入れてサンプリング速度を決定する必要がある (図 26)。



図 26: flash ADC 方式 [9]

アナログメモリサンプリング方式

スイッチを切り替えることによってキャパシタに波形を記録する方式で、その切り替え速度は毎 秒数百 MHz~数 GHz の速度である。この方式では専用の ASIC が用いられる。記録できる時間 は、キャパシタ数とサンプリング時間の積で決まり、数 µ秒のトリガー遅れに対応することが できる。すべてのキャパシタに電荷が蓄積すると波形記録をストップし、蓄積された電荷を AD 変換し、FPGA 内に保存する。ここで用いられる ADC は、flash ADC 方式で用いられている ADC よりも一桁遅いものが使用できる。しかし、入力ダイナミックレンジは 12 ビット程度であ り、flash ADC 方式と同様、2 種類の増幅率を持つ並列回路、または増幅切り替えが必要となる。 アナログサンプリング方式では GHz という高速でのサンプリングができ、また、flash ADC 方 式で用いられている ADC よりも一桁遅い ADC が使用できるため、低消費電力で、さらに低コ ストである。GHz サンプリングが要求される大口径望遠鏡の開発を主に行う CTA-Japan では、 こちらの方式が採用され、現在は大口径望遠鏡のカメラ試験で使用している (図 27)。



図 27: アナログメモリサンプリング方式 [9]

3.8 トリガー・データ転送

それぞれの望遠鏡のトリガーは、最初にピクセルや各クラスタの閾値判定を行う(1次トリガー)。次 に望遠鏡1台で、クラスタ間での通信により、閾値判定を行う(2次トリガー)。そして望遠鏡全体の トリガーを司るコンピューターに送り、チェレンコフ光がそれぞれの望遠鏡に到達する時間差を考慮 して、望遠鏡間のコインシデンスの有無によりデータの転送や破棄がなされる(3次トリガー)。

#### 3.9 DRS ボード開発

大口径望遠鏡で用いられる光検出器モジュールを重点的に開発を進めている日本グループでは、ク ラスタ単位で波形の取得、読み出しを成功させた。この光検出器モジュールで用いられている読み出 し回路基板 (図 28) は、イタリアグループとの協力し、DRS4 チップとイタリア製のトリガ回路が採用 されている。トリガ閾値の設定やデータ処理は FPGA で行い、取得された波形データは G-bit イーサ ネットで転送される。この基盤と光電子増倍管を接続し、LED 光を読み出すというシステムを世界に 先駆けて成功させた。



図 28: DRS ボード [19]

図 29 は DRS ボードの信号の流れを示している。



図 29: DRS ボードブロック図 [9]

望遠鏡の焦点面にある光電子増倍管で捉えられた光の波形は、図22のカメラで、以下の流れで記録 される。

• 光電子増倍管 + Cockcroft-Wolton 回路 + プリアンプ

光電子増倍管で光が捉えられると、Cockcroft-Wolton回路<sup>1</sup>で光電子増倍管に高電圧をかけることによって光電子を増倍する。そしてさらにプリアンプで電流が増幅され、電圧に変換される(図 30)。



図 30: 光電子増倍管 + Cockcroft-Wolton 回路 + プリアンプ

- スローコントロールボード
  - DAC によって Cockcroft-Wolton HV の制御をする。
  - ADC によって Cockcroft-Wolton HV の電圧値と HV の DC アノードカレントのモニター をする。
  - 範囲内の温度、湿度に保つための温度と湿度のセンサー。
  - アナログメモリの電圧値を測定するため、テスト信号を発信する。



図 31: スローコントロールボード [18]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>高圧電源を得るために使用される整流回路の一種。コンデンサとダイオードを多段式に組み合わせることによって、低 電圧の交流電源を高電圧の直流電源へ変換できる [11]。

• メインアンプ

メインアンプは、要求仕様であるダイナミックレンジ (1p.e.~3000p.e.) を達成するために PMT1 本につき 1 枚取り付けられ、それは 7 枚のフロントエンド基板から成る (図 32)。メインアンプ において、PMT からの信号が 1/4 に減衰する Low gain、10 倍に増幅される High gain、4 倍に 増幅される Trigger から成る。High gain、Low gain 両方にすることで広いダイナミックレンジ を達成できる。High gain、Low gain を通った信号は DRS4 チップへ、Trigger を通った信号は、 トリガー生成回路へ流れる。



図 32: フロントエンドカード [19]

- DRS4 チップ DRS4 チップのチャンネルは、カスケード接続が可能である。日本で開発している DRS4 ボード では、4 チャンネルのカスケード接続を行い、4096cellまで記録深さを増やす。 サンプリング速 度 2GHz のとき、2μの記録長でサンプリングできる。
- トリガー回路 メインアンプからきた信号は、アナログトリガー回路において 1.5 倍に増幅された後、コンパ レータを通って 10bit の DAC で閾値判定を行う。その後、FPGA で制御される。



図 33: トリガー回路 [19]

 G-bit イーサネット 波形データは G-bit イーサネットで読み出す。
# 4 DRS4チップ

3章で述べたように、CTA-Japan では大口径望遠鏡のカメラ開発において、チェレンコフ光の波形読 み出しにアナログメモリサンプリング方式を採用している。スイスの PSI (Paul Scherrer Institut) で 開発された DRS4 チップ (Domino Ring Sampler) は、CTA の要求仕様を満たすアナログメモリ ASIC である。



図 34: DRS4 チップ (1) [7]



図 35: DRS4 チップ (2) [7]

# 4.1 DRS4 チップの仕様および動作原理

DRS4 チップは約 5GHz までのサンプリング速度でサンプリングできるアナログメモリ ASIC で、8 つのチャンネルでサンプリングできる SCA(Switched Capacitor Array) である。高速の読み出しエレ クトロニクスであり、安価 (28.00€/unit) で、低消費電力であるため、信号の幅が数ナノ秒のチェレ ンコフ光の信号波形を多くのカメラで記録するのに適している。

DRS4 チップの仕様は以下の通りである。

- 電源 2.5V
- 入力、出力 差動入力
- サンプリング速度 700MHz 5GHz
- チャンネル数 8+1 チャンネル (それぞれ 1024cell)
- ビット数 11.5bit<sup>1</sup>
- 帯域幅 950MHz
- ADC による読み出し速度 33MHz
- S/N比
   69dB<sup>2</sup>(オフセット補正後)
- ランダムノイズ 0.35mV<sub>rms</sub>



図 36: DRS4 チップ (3) [7]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>およそ 1000mV の信号を 0.35mV の精度で測定できる。2<sup>11.5</sup>~2896, <sup>1000[mV]</sup> ~2857 <sup>2</sup>信号の電圧を 1000mV と決めたときに、ノイズが 0.35mV と決まる。20log<sub>10</sub> <sup>1000[mV]</sup> ~69.1[dB]

DRS4 チップのチャンネルのうち、8 チャンネルは波形記録、1 チャンネルは external digitarization に使用される。1 チャンネルあたり 1024 のキャパシタがあり、チャンネルはチェインして 4×2048cell, 2×4096cell の記録深さにすることができる。そして、チップはそれぞれのキャパシタ間でスイッチ切 り替えができる仕組みになっている。この仕組みにより、波形記録用の一つのキャパシタに電荷が蓄 えられるとスイッチが一つ開いて、また次のキャパシタに電荷を蓄えられるということが繰り返され る。すべてのキャパシタに電荷が蓄えられると、今度は読み出し用の一つのスイッチが開き、ADC で 一つのキャパシタの読み出しが終わるとまた次のスイッチが開いて次のキャパシタの読み出しを行う という繰り返しになる (Domino wave 回路 (図 37))。波形を記録するときは高速 GHz サンプリングを 行い、読み出しをするときは MHz で一桁遅い速度で読み出しができるため、低コストの低速 ADC を 用いることができ、消費電力も低く抑えられる。



図 37: Domino wave 回路 [7]

# 4.2 DRS4 評価ボード (DRS4 Evaluation Board V3)



図 38: DRS4 評価ボード [7]

本節では、本研究で使用した DRS4 評価ボードについて述べる [7]。DRS4 チップの開発元の PSI では、DRS4 チップをユーザーが開発しているエレクトロニクスに使用する際のチップ評価用のボードとして、DRS4 評価ボードを提供している (図 38)。この評価ボードは、チップの特性を知るための最小限の回路が用いられている。

以下は、この回路に実装されている主なエレクトロニクスである。

- ・ オペアンプ: THS4508 from Texas Instrument
- アナログスイッチ: ADG901from Analog Devices
- 16bit DAC(デジタルアナログ変換)
- 14bit ADC : AD9245 from Analog Devices
- FPGA : Xilinx Spartan 3

DRS4 評価ボードにおいて、DRS4 チップは差動入力であるため、50Ω でターミネートされたシング ルエンド入力を差動入力に変換するために 4 つのオペアンプが用いられている。オペアンプの前のア ナログスイッチはキャリブレーションの間入力と切り離すために用いられる。また、DAC から DRS4 チップにリファレンス電圧を入力し、電圧較正を行う。入力は、2 チャンネルをチェインして 2048cell の深さにしている。その 4 つのアナログ入力は AC カップリングで、その入力範囲は 1V である。ま た、波形の読み出しは ADC で行い、FPGA で制御する。USB2.0 によって 20MB/sec 以上のデータ 転送が可能である。 4.3 DRS4 評価ボードライブラリの概要

DRS4 評価ボードには、評価ボードを動作させるためのライブラリが用意されている (version 2.8.9)。 本研究では、ライブラリを Linux PC にインストールして使用した。

ライブラリはC++言語が使用され、関数群が書かれたメインファイルとヘッダーファイルが用意されている。メインファイルの関数群を呼び出すプログラムを作成し、Make file でコンパイルを行った。 メインファイルでは、以下の3つのクラスが用意されている。

- DRS class : ハードウェアの制御を行う。
- DRSBoard class : データのやり取りを行う。
- ResponseCalibration class : 旧 version でのチップで使用される。

また、評価ボードには"drsosc"という PC 上のアイコンで操作するソフトウェアが用意されており、 それによって PC のモニターで DRS4 チップの出力波形を見ることができる。

# 5 DRS4評価ボードライブラリの解析およびライブラリの拡張

DRS4 チップは、CTA-Japan の大口径望遠鏡の信号読み出しチップとして採用されているが、DRS4 読み出し回路に実装するにあたり、チップの各 cell の温度依存性は測定されていない。そこで、温度 変化によってチップがどのような応答の変化を示すかを理解し、チップのキャリブレーションを考え る必要がある。そのために、まずはチップの一般的なキャリブレーション方法を把握する必要がある。 まず、一般的な各 cell のキャリブレーション方法を確立するため、DRS4 評価ボードのライブラリの解 読を行って、キャリブレーション方法を調査した。その際、ライブラリからオフセット、ゲイン、タ イミングのキャリブレーションパラメータを探し出し、ライブラリを拡張してキャリブレーションパ ラメータを読み出す関数群を作成した。そして、各 cell のキャリブレーションパラメータが温度変化 によってどのように変化するかを測定した。

5.1 解析方法

5.1.1 オフセットキャリブレーションの解析方法

DRSboard class にオフセットパラメータを取得するメソッドを追加して解析を行った。

• 使用した関数 float GetCellOffsetmV(int i)

DRS4 チップの測定できる電圧は、評価ボードの仕様により、-0.5V~+1.0Vの範囲内において 1.0V である。つまり、測定できる電圧の中心の値は 0V~+0.5V になる。ライブラリにおいては、測定でき る電圧の範囲は -0.5V~+0.5V で、測定できる電圧の中心の値は 0V となっているが、ライブラリ内 のこの中心の値を書き換えることで測定範囲を変更することが可能である。

図 39 は電圧の中心の値が 0V のときの、DRS4 評価ボードにおける電圧測定可能範囲を示している。

中心の値の値は次の関数で設定する。
 int DRSBoard::SetInputRange(double center)



図 39: DRS4 評価ボードにおける電圧測定可能範囲

評価ボードでオフセットキャリブレーションする場合、DAC から定電圧を入力する。このときの電 圧値は上で述べた測定できる電圧の中心の値である。図 40(左) は DAC から 0V の定電圧を入力したと きの、ライブラリでキャリブレーションされた各 cell のオフセットパラメ - タを読み出すプログラム を作成し、オフセットと cell 番号の関係をプロットしたグラフである。また、図 40(右) はデータシー トによるオフセットと時間の関係の関係である (5GHz サンプリング)。およそ 500cell でオフセットの 値が変化することが分かる。これはハードウェアの特性によるものである。



図 40: 実測によるオフセットと cell 番号の関係 (左), データシートによるオフセットと時間の関係 (右)

5.1.2 ゲインキャリブレーションの解析方法

ゲインは、入力電圧とオフセット補正された出力電圧の比で表される。DRS4 チップの測定できる 電圧の範囲は前節で述べたとおりである。ゲインの解析は、DRSboard class のゲインパラメータを取 得するメソッドを追加して解析を行った。

#### 使用した関数

double GetCellGain(unsigned int chipIndex, int i)

評価ボードでオフセットキャリブレーションする場合は DAC から測定できる電圧の中心の値の定 電圧を入力した。ゲインキャリブレーションする場合はこの電圧値と、さらにこの電圧値+0.4V の定 電圧を DAC から入力する。このとき、電圧の中心の値つまり、オフセットの値を V<sub>offset</sub>, 電圧の中心 の値+0.4V の電圧値を入力電圧として V<sub>in</sub>、この入力電圧に対する出力電圧を V<sub>out</sub> とすると、ゲイン パラメータは以下の式で表される。

$$V_{\text{gain}} = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{offset}}}{V_{\text{in}}} \tag{17}$$

図 41(左) は電圧の中心の値 0V のときの、ライブラリでキャリブレーションされた各 cell のゲイン パラメ - タを読み出すプログラムを作成し、ゲインと cell 番号の関係をプロットしたグラフである。 また、図 41(右) はデータシートによる入力電圧と出力電圧の関係である。この図の一次関数の傾きか ら、ゲインはおよそ 0.9 であると分かる。



図 41: 実測によるゲインと cell 番号の関係 (左), データシートによる入力電圧と出力電圧の関係 (右)

5.1.3 タイミングキャリブレーションの解析方法

タイミングのキャリブレーションを行う上で、DRS4 チップの1 チャンネル (1024cell) 読み出す時間が、理想的な入力電圧のサンプリング長さとどのくらいのずれがあるかを検証する。タイミングのキャリブレーションを行うために、FPGA から 132MHz の矩形波を入力する。各波に対して入力された波の幅とチップで実測された波の幅を比べていくことで、各 cell ごとの時間 bin の伸び縮みを求めて補正を行う。



図 42: タイミングキャリブレーションのイメージ。時間 bin の幅の誤差を求める (左)。矩形波の波を 一つずつ着目してキャリブレーションする (右)。

以下でライブラリによるタイミングの具体的な解析方法を述べる。DRSboard classのタイミングパ ラメータを取得する関数を用いて解析を行った。

使用した関数

int DRSBoard::CalibrateTiming(DRSCallback \*pcb) int DRSBoard::GetStopCell(unsigned int chipIndex)

この関数内で以下の関数が使用されていて、実質的にキャリブレーションを行っているのはこの関数である。

int DRSBoard::AnalyzeWF(int nIter, float wf[kNumberOfBins], int tCell, double cellT[kNumb erOfBins])

タイミングの解析は矩形波の波一つに着目して補正を行い、それを順にすべての波に適用していく 形で行われる。この解析を多数の event で行い、最も良いタイミングの値に収束させていく。まず、1. から 5. で波高値の符号が変わる点 (crossing point)を求め、そこから実測の波の幅を求めていく。こ こで、理想的な場合のサンプリング周波数を  $f_{cal}$ [GHz](=[1GHz] とする。)、FPGA からの入力周波数 を f[MHz] とする。

- 1. 全 cell の波高値を足し上げ、1024 で割る。これで全 cell の波高値の平均が求まる。そして、各 cell の波高値からその平均を引く。これでペデスタルが求まる。
- 2. サンプリング周波数から 1024cell の時間 bin の幅の合計  $(=(1/f_{cal}) \times 1024[nsec])$  を見積もる。そして、矩形波の周期は 1/f なので、先ほどの時間 bin の幅の合計を割ることで、1024cell に含ま

れる矩形波の波の個数を見積もり、これを nest とすると、

$$nest = \frac{\frac{1}{f} \times 1024}{\frac{1}{f_{cal}}}$$
$$= \frac{f_{cal} \times 1024}{f}$$
(18)

となる。

 5. 矩形波の立ち上がり、立ち下がりにあたる cell(隣り合う cell の波高値がプラスからマイナスに、 もしくはマイナスからプラスに変化する直前の cell(波高値の符号が変わる点))を crossing point と呼ぶことにする。ここでは、トリガーがかかった cell の 3cell 後の cell から 1023cell 後までの cell を解析する。つまり、図 43 においてトリガーがかかった cell を紫の点線の cell とすると、矢 印の範囲を解析から除くということになる。1024cell の中に含まれる crossing point の数を nzx とする。



図 43: タイミングの解析方法。紫の線は、トリガーがかかってデータを読み始める cell の位置。

- 4. *nzx* と *nest* の差が、*nest*、つまり予測よりも 10% 以上大きい場合ノイズが混入したとして、その event データは用いないことにする。
- 5. crossing point の1番最初と2番目を通る一つの矩形波の波の幅を求める。このとき、i1, i2を 各 crossing point の cell 番号とし、1番最初の crossing point がある cell を i1, i1 の次に crossing point がある cell を i2とする。また、それぞれの cell の波高値を wf[i1], wf[i2]、それらの cell の隣の cell の波高値を wf[i1+1], wf[i2+1]とする。i1, i2で波高値 0 のラインと交わる点をよ り正確にするため、crossing point のすぐ隣りの cell(それぞれ i1 + 1, i2 + 1)の波高値と自身の 波高値との直線近似をして、その直線と波高値 0 のラインとの交点を求める (図 44)。これらの 交点をそれぞれ ta, tbとする。tb - ta(矩形波の幅) が 0 未満の場合、tb は 1023cell を超過して 0 cell に戻ってきた後の cell となるので、tb は tb の値に、 $(1/f) \times 1024$  を加える。



図 44: 波高値を用いたタイミングの補正方法

- \* 以下では、矩形波の波を一つずつ順に着目していく。着目した波が含まれる cell の時間 bin が 縮む場合はそれ以外の cell の時間 bin は伸び、逆に着目した波が含まれる cell の時間 bin が伸び る場合はそれ以外の cell の時間 bin は縮むと考える。着目した波が含まれる cell と、それ以外の cell それぞれに異なる補正パラメータを計算し、それぞれの cell の時間 bin の伸び縮みを考えて いく。
- 6. f から予測される一つの矩形波の幅と、実測の矩形波の幅との差を corr とする。ただし、ノイ ズなどが原因で corr を入力信号の周期で割った値が 0.5 以上になった場合、参照する波の方が ノイズ等で歪んでいる可能性があるので、その矩形波のデータは用いないことにする。
- 7. damping という factor を、

damping 
$$=\frac{f}{500}$$
 (19)

とする。*corr* に damping をかけて、以後この値を *corr* とする。タイミング補正は多数イベント を用いたモデルのフィットであり、補正の変化率を大きくしすぎるとフィットが発散してしまう 可能性がある。そのため、damping をかけることにより、フィットを安定させる。

- 8. *corr* に -1 をかけた値を *invcorr* とする。これは、着目する波に含まれる cell 以外の部分を *corr* と逆の補正をするために用いる。
- \* ここで、波の立ち上がり、立ち下がりの cell を含まない波の内側の領域を補正するためのパラ メータを決める。
- 9. *i*1 は着目する波の外側にある cell であるので、*i*1 の二つ右隣の cell、*i*1 + 2 を新たに *i*1 と定義 し直す。

- 10. *corr* を i2 i1 + 1 で割り、新たにこれを *corr* と定義する。このようにすることで、*corr* は、矩形波の一つの波の幅の内側に含まれる cell の、1 cell あたりの予測される時間幅  $(1/f_{cal})$  からの 1 cell あたりのずれを表すことになる。
- 11. 波の外側も同様に、invcorrを1024 (i2 i1 + 1)で割り、新たにこれをinvcorrと定義する。 着目する波の外側の cell の、1 cell あたりのずれを表すことになる。
- \* 9.~11. で決めた補正パラメータを使って補正を行う。補正は0番目の cell を時間の基準として、 そこからの経過時間に対して補正をかける。
- 12. 0番目の cell からの時間を、cell 番号を j ( $0 \leq j < 1024$ ) として cellT[j] と表し、

$$cellT[j] = \frac{1}{f} \times j \tag{20}$$

を cellT の初期値とする。

- \* ここで 13.~16. までを  $j(0 \leq j < 1024)$  に対して繰り返し、全ての cell に対して補正を行う。
- 13. まず、 $t_{corr}$  という変数を定義し、j = 0のとき、 $t_{corr} = 0$ とする。そして、dtを次のように定義する。

$$dt = cellT[j+1] - cellT[j]$$
(21)

14. また、*cellT*[*j*] を

$$cellT[j] = t_{corr} \tag{22}$$

とする。j = 0のとき $t_{corr} = 0$ であるため、 $cellT[0] = t_{corr} = 0$ となる。

- 15. *j* が波の内側の場合、*dt* に *corr* を加え、外側の場合、*dt* に *invcorr* を加えてその値を新たな *dt* とする。
- 16.  $t_{corr}$  に dt を加えた値を新たな  $t_{corr}$  とする。例えば、j = 0 のとき  $t_{corr}$  は、

$$t_{corr} = t_{corr} + dt \tag{23}$$

$$= t_{corr} + cellT[1] - cellT[0] + (corr \quad or \quad invcorr)_{j=0}$$

$$(24)$$

$$= 0 + cellT[1] - 0 + (corr \quad or \quad invcorr)_{j=0}$$

$$\tag{25}$$

$$= \frac{1}{f} \times 1 + (corr \quad or \quad invcorr)_{j=0}$$
(26)

となる。

17.13.~16.を全ての cell に対して繰り返すと、一つ目の波の補正をしたとき、

$$cellT[0] = 0$$
  
$$cellT[1] = \frac{1}{f} \times 1 + (corr \quad or \quad invcorr)_{j=0}$$
(27)

### $cellT[1023] = \frac{1}{4} \times 1023 + corr \times x + invcorr \times y$

となる。ただし、x + y = 1023 で、x は波の内側の cell の数を表しているため、10. より、

$$x = i2 - i1 + 1 \tag{28}$$

$$y = 1023 - (i2 - i1 + 1) \tag{29}$$

となる。

- \* 次に、時間 bin が理想値に対して大幅に短い (理想値の 10 分の 1) 場合の補正を行う。時間 bin が理想値に対して大幅に短い場合、フィットが発散してしまう可能性がある。そのため、補正量 を小さくして補正する必要がある。まず、18.~22. を、*j* 番の cell に対して 0 ≦ *j* < 1023 の範囲 で繰り返す。ただし、19. の条件に当てはまらない場合、19.~22. の処理は行わず、18. のみで次 の cell の補正を行う。
- 18. 補正された 0 番目の cell からの時間を、cell 番号を j ( $0 \leq j < 1023$ ) として cellT[j] とする。

$$dt = cellT[j+1] - cellT[j]$$
(30)

このときの cellT[j] は、17. で補正された値である。

- \* 19.~22.は、時間 bin が理想値に対して大幅に短い cell に対してのみに対して行う。
- 19. 補正された値 dt が予測値 (1/f) の 10 分の 1(=0.1nsec, 1GHz サンプリングの場合) 未満のとき、

$$corr = 5 \times (\frac{1}{f} \times 0.1 - dt) \tag{31}$$

として、補正量を小さくしてフィットの発散を抑える。また、着目する時間 bin が短い cell 以外 の cell に対して逆の補正するため、*corr* に -1 をかけた値を *invcorr* とする。

$$invcorr = -corr \tag{32}$$

そして、それらの cell を等しく補正するため、*invcorr* を 1022 で割った値を新たに *invcorr* と する。

$$invcorr = -\frac{5 \times (\frac{1}{f} \times 0.1 - dt)}{1022}$$

$$(33)$$

\* 20.~22. では、次で定義する k 番の  $cell(0 \le k < 1024)$  を全ての cell について繰り返す。これは、変数 j に対するループ文の中でのループ構造である。

20. 新たにk = 0のとき、 $t_{corr} = 0$ と定義し直す。また、dtも次のように定義し直す。

$$dt = cellT[k+1] - cellT[k]$$
(34)

このときの dt は、18.の dt と同じ値である。

21. ここで、14. と同様に

$$cellT[k] = t_{corr} \tag{35}$$

とする。k = 0のとき $t_{corr} = 0$ であるため、 $cellT[0] = t_{corr} = 0$ となる。

22. k = jのとき、つまり着目する時間 bin が短い cell に対して、dtの値に corr を加えた値を新た に dtとする。 $k \neq j$ のとき、つまり着目する時間 bin が短い cell 以外に対して、同様に dtの値 に *invcorr* を加えた値を新たに dtとする。

$$dt = dt + corr \qquad (k = j) \tag{36}$$

$$dt = dt + invcorr \qquad (k \neq j) \tag{37}$$

そして、16. と同様、 $t_{corr}$  に dt を加えた値を新たな  $t_{corr}$  とする。

$$t_{corr} = t_{corr} + dt \tag{38}$$

 $20\sim22$ . を $0 \leq k < 1024$ の範囲で順に繰り返す。

- 23. j 番の cell の補正が終わったら、次のj + 1 番の cell の補正を 18. から繰り返す。これをj = 1022まで繰り返す。
- \* これで一つ目の波に対する補正が行われた。
- 24. 二つ目の波の補正をするために、5. において 2 番目と 3 番目の crossing point を通る波を考える。三つ目以降の波に対しても同様に補正を行う。
- 25. 6. で用いなかったデータの数が nzx, つまり crossing point の数の 3 分の 1 より大きければ、理想値と実測値の差が大きすぎるため、その event のキャリブレーションは失敗とする。
- 26. すべての波の補正が行われたら、同じ処理を1000event 分繰り返す。

図 45 は DRS4 評価ボードのライブラリから各 cell のタイミングパラメータを読み出すプログラム を作成し、ライブラリでキャリブレーションされた各 cell のタイミングパラメ - タの積算値と cell 番 号の関係をプロットした図である。



図 45: 実測によるタイミングの積算値と cell 番号の関係

## 6 DRS4評価ボードにおける DRS4 チップ特性評価

5 章で述べたように、チップの各 cell のキャリブレーションの方法はまだ確立されていない。そして、各 cell ごとの波高値が温度によってどのような特性を示すかについても、測定されていない。そこで、DRS4 評価ボードのライブラリの解析方法を参考にしてオフセットとゲインのキャリブレーションを行い、その温度特性を調べた。

実際、カメラ内の温度範囲はおよそ+10~+50 であるので、この温度範囲をもとに実験を行った。 そして、測定結果を用いて CTA 望遠鏡で DRS4 チップを使用する際のキャリブレーションについて 考察した。

### 6.1 温度特性評価実験の実験方法

DRS4 評価ボードのライブラリでは、DAC から DRS4 チップに電圧を入力していた。しかし、本実 験方法では、図 46 のように評価ボードを恒温槽内に入れて実験を行うため、評価ボード上の DAC も 温度変化を受けてしまうことになる。そこで、恒温槽の外部にあるパルサーから評価ボードに信号を 入力し、温度依存性の測定を行った。このとき、パルサーの入力電圧と出力電圧のデータを用いて、 オフセットとゲインの値が温度によってどのように変化するか cell ごとに調べた。DRS4 チップのオ フセット、ゲインのキャリブレーションを行うために、以下の実験装置を用いた。

#### 使用した実験装置

- \* DRS4 評価ボード (board no.7)
- \* LinuxPC
- \* KEITHLEY 50MHz Arbitrary Waveform/Function Generator 3390 frequency resolution :  $1\mu$ Hz amplitude range :  $10mV_{pp} \sim 10V_{pp}$  in  $50\Omega$ amplitude accuracy : (at 1kHz) ± 1% of setting ±  $1mV_{pp}$ 出力波形 : sine, square, triangle, noise, DC, etc

- 矩形波 rize/fall time : <10nsec overshoot : <2% asymmetry : 1% of period + 5nsec(50% Duty) jitter(RMS) : 1nsec+100ppm of period

\* ESPEC 低温恒温器 LU-113
電源: AC 100V, 1φ, 50/60Hz
最大電流: 9A
外囲温度 (運転可能範囲): 0~+40
温度範囲: -20~+85
内法 (W×H×D): 500×600×390mm
外法 (W×H×D): 650×1090×805mm
重量: 約 90kg

### 実験のセットアップ

DRS4評価ボードをPCとUSBケーブルで接続した。また、評価ボードの入力はSMA<sup>1</sup>であり、LEMO ケーブルを使用するためにSMA-BNC<sup>2</sup>変換コネクタを繋いでからLEMOケーブルと繋ぎ、パルサー と繋いだ。評価ボードは恒温槽のケーブル孔を通して恒温槽内に入れた。



図 46: 実験セットアップ (左上,右上), 恒温槽内 (左下), 恒温槽操作パネル (右下)

 $<sup>^{-1}</sup>$ 特性インピーダンス  $50\Omega$ のコネクタ。適用周波数上限は  $\sim 18 \mathrm{GHz}$ 。

 $<sup>^2</sup>$ 周波数特性が比較的良い。太い同軸ケーブルには不向きである。特性インピーダンスは一般に  $50\Omega$ 。適用周波数上限は  $\sim 4 GHz$ 。

#### 6.2 解析方法

オフセット、ゲインの温度特性を解析によって求めた。その際、DRSboard classに生データと温度を取 得するメソッドを追加して解析を行った。温度を取得するメソッド double DRSBoard::GetTemperature() により、恒温槽内の温度設定とそれぞれの温度のときの評価ボード内の温度を確めた。評価ボード内の 温度は、恒温槽内の温度よりもおよそ15 高くなる傾向があったため、恒温槽内の設定温度を-5~40

と、評価ボード内の温度に合わせて要求よりも低い温度で測定した。

測定を行う際、5分おきに評価ボード内の温度を記録し、温度が安定してから測定を行った。図 47 は、恒温槽内の設定温度 +20 のときの評価ボード内の温度変化であり、~30分程度で評価ボード内 の温度は安定した。



図 47: 評価ボード内の温度と経過時間の関係

以下にオフセット、ゲイン、タイミングのDRS4評価ボードライブラリによる解析方法と結果を示す。

#### 6.2.1 オフセットキャリブレーションの解析方法と結果

ライブラリから、キャリブレーションされていない波高値の生データを読み出すプログラムを作成し、無入力で1024cellの波高値を1000eventのオフセットの測定を行った。そして、各 cell ごとの平均値と誤差を求めた。

#### 使用した関数

int DRSBoard::GetRawWavemV (unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float \*waveform, bool adjustToClock)

表1は、恒温槽の設定温度と、オフセット電圧を測定した瞬間の評価ボード内の温度である。

恒温槽内設定温度	評価ボード内の温度
-5	10.125
0	15.5
10	25.0625
20	35
30	44.5625
40	53.9375

表 1: 恒温槽内の設定温度と評価ボード内の温度 [ ](オフセット測定時)

図 48 は、縦軸オフセット、横軸評価ボード内の温度として  $10\sim25$  番目までの cell をプロットして 一次関数でフィッティングしたグラフである。オフセットは 1000 event の平均値であり、また、平均値 からの標準誤差をエラーバーの値としてプロットした (平均値 ≫ 平均値からの標準誤差, であるため、 エラーバーが見られない)。典型的な標準誤差は  $10^{-4}\sim10^{-5}$  mV である。



図 48: 10~25 番目の cell のオフセットパラメータと温度の相関

また、図 49 は全 cell のオフセットの温度変化率のヒストグラムである。温度変化率は、図 48 で示したようなグラフを全 cell に適用し、フィッティングした一次関数の傾きをパラメータとして求めた結果である。

温度変化率の各 cell の平均は -0.1201[mV/] であり、分散は 0.02031[mV/] となった。



図 49: 各 cell のオフセットの温度変化率

#### 6.2.2 ゲインキャリブレーションの解析方法と結果

評価ボードの入力が AC カップリングであるため入力周波数によって波形が変化するので、まずは パルサーから DRS4 評価ボードに様々な矩形波を入力して波形の変化を調べた。その際、ライブラリ から、キャリブレーションされていない波高値の生データを読み出すプログラムを作成した。

使用した関数

int DRSBoard::GetRawWavemV(unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float \*waveform, bool adjustToClock)

DRS4 評価ボードから出力される波形は、入力波形の信号が遅いほど歪み、速いほど安定してくる。 図 50 の左の図は、2MHz の矩形波を入力したときの DRS4 評価ボードから出力される波形、中央は 100kHz、右は100Hz の入力に対する出力波形である。解析に用いるデータ量を増やすには遅い信号を 入力する必要があるが、遅い信号を入力すると右の図のように波形が歪んでしまう。そこで、解析す る上で解析に用いることができるデータ量がそれなりに確保でき、歪みがほぼなくなる 2MHz の矩形 波で解析を行った。



図 50: DRS4 評価ボードの出力波形: 2MHz(左), 100kHz(中央), 100Hz(右)

恒温槽内		
設定温度	評価ボード内の温度 (入力電圧 400[mV])	評価ボード内の温度 (入力電圧 800[mV])
-5	11.3125	11.375
0	16.1875	16.25
10	25.375	25.4375
20	35.4375	35.5625
30	44.5625	44.625
40	54.125	54.625

表 2: 恒温槽内の設定温度と評価ボード内の温度 [](ゲイン測定時)

表2は、恒温槽の設定温度と、ゲインを測定した瞬間の評価ボード内の温度である。



図 51: 矩形波のイメージ

次に、周波数 2MHz, Duty Cycle50% の矩形波を、電圧 400mV, 800mV それぞれ 1000event 測定し た。そして、1024cell の最初と最後の 9cell と、立ち上がり、立ち下がりにあたる cell とその前後 5cell ずつ、トリガーをかけてデータを読み始める cell とその前後 5cell ずつを解析の際、除いた (図 51 の矢 印の範囲のデータを解析に用いた)。そのデータを用いて縦軸に出力データ、横軸に入力データとして プロットし、一次関数でフィッティングした。その一次関数の傾きをパラメーターとして各 cell、各温 度ごとにゲインを求めた。

図 52 は恒温槽内の設定温度が 20 のときの入力電圧と出力電圧を、縦軸出力電圧、横軸入力電圧 として 10~25 番目までの cell をプロットして一次関数でフィッティングしたグラフである。1000event の波高値のデータを cell ごとにプロットし、ランダムノイズ (=0.35mV<sub>rms</sub>) をエラーバーの値として プロットした (出力電圧 ≫ ランダムノイズ, であるため、エラーバーが見られない)。



図 52: 20 , 10~25 番目の cell の入力電圧と出力電圧の相関

また、図 53 は縦軸ゲイン、横軸評価ボード内の温度として、10~25 番目までの cell をプロットして 一次関数でフィッティングしたグラフである。ゲインは上記の方法で求めた値であり、平均値からの標 準誤差をエラーバーの値としてプロットした (平均値 ≫ 平均値からの標準誤差, であるため、エラー バーが見られない)。典型的な標準誤差は、~10<sup>-5</sup> である。



図 53: 10~25 番目の cell のゲインパラメータと温度の相関

また、図 54 は 1024cell のうち端の 9cell を除いたゲインの温度変化率の値のヒストグラムである。 温度変化率は、図 53 で示したようなグラフをこれらの cell に適用し、フィッティングした一次関数の 傾きをパラメータとして求めた結果である。

各 cell の平均は -0.1949×10<sup>-3</sup>[/ ]であり、分散は 1.619×10<sup>-5</sup>[/ ]となった。



図 54: 9~1014 番目の cell のゲインの温度変化率

### 6.2.3 タイミングキャリブレーションの解析方法と結果

評価ボードに周波数 25MHz, 電圧 800mV, Duty Cycle50% の矩形波を入力し、 1000event 測定した。入力周波数が低いほど図 55 のように波形が歪んでしまうので、パルサーの仕様で矩形波において 一番高周波の信号である 25MHz の矩形波を測定した。



図 55: 周波数ごとの各 cell のタイミングのパラメータの積算値

また、図 55 における赤の線は、FPGA からの入力信号である。FPGA からの入力は、サンプリン グ速度をソフトウェア上で 1GHz として処理しようとしても、評価ボードは FPGA の 33MHzclock を 基準として駆動しているため、ハードウェアでは 1.007GHz でサンプリングを行っている。

恒温槽内	
設定温度	評価ボード内の温度
-5	11.5
0	16.3125
10	25.3125
20	35.3125
30	44.5625
40	54.625

表 3: 恒温槽内の設定温度と評価ボード内の温度 [](タイミング測定時)

表3は、恒温槽の設定温度と、タイミングを測定した瞬間の評価ボード内の温度である。

5.1.3 節で述べた、ライブラリで使用されている関数を用いてプログラムを作成し、タイミングの キャリブレーションを行った。サンプリング速度が1GHz なので、タイミングパラメータの積算値は 測定時間から 1nsec×cell 番号を引いた値で解析を行った。

使用した関数

int DRSBoard::AnalyzeWF(int nIter, float wf[kNumberOfBins], int tCell, double ce llT[kNumb erOfBins])

int DRSBoard::GetStopCell(unsigned int chipIndex)

図 56 は各 cell のタイミングパラメータの積算値を温度ごとに示している。



図 56: 温度ごとの各 cell のタイミングパラメータの積算値

図 57 は縦軸タイミングパラメータの積算値、横軸評価ボード内の温度として、ランダムに 16cell を プロットして一次関数でフィッティングしたグラフである。このグラフのフィッティングした一次関数 の傾きを温度変化率とした。一次関数の傾きと切片の初期値は、それぞれ –0.0005, 1.5 である。0cell はタイミングキャリブレーションにおいてタイミングパラメータの積算値を求める際の基準の cell と なるので、タイミングパラメータの積算値は全ての温度で 0 である。また、1023cell はキャリブレー ションの結果、全ての温度においてタイミングパラメータの積算値は 0 になった。そのため、これら の cell はフィッティングせず、この解析では省略した。



図 57: ランダムに選んだ cell のタイミングパラメータの積算値と温度の相関

フィッティングする際、タイミングパラメータの積算値のエラーは、同じ条件で2回測定を行い、その結果を cell ごとに差をとり、cell ごとのヒストグラムの分散とした (図 58)。



図 58: 各 cell の 2 回の測定によるタイミングパラメータの積算値の差

また、図 59 は全 cell のタイミングの温度変化率のヒストグラムである。温度変化率は、図 57 で示したようなグラフを全 cell に適用し、フィッティングした一次関数の傾きをパラメータとして求めた結果である。

温度変化率の各 cell の平均は -0.002251 [nsec/] であり、分散は 0.00121 [nsec/] となった。



図 59: 各 cell のタイミングパラメータの積算値の温度依存性

#### 6.3 議論

DRS4 チップのライブラリで行われているチップの cell ごとのオフセットとゲイン、タイミングの キャリブレーションの方法を理解した。それによって得られるキャリブレーションパラメータが温度 に対してどのように変化するかを調べるため、恒温槽を用いて温度を変化させ、cell ごとにどのよう に変化するかを検証した。尚、議論する上でサンプリング速度は、1GHz(1cell=1ns)を仮定する。

解析の結果、オフセットの温度変化率の各 cell の平均は -0.1201[mV/]であり、分散は 0.02031[mV/] であると分かった。各 cell のオフセットが検出結果にどのような影響を及ぼすかを検証する。

まず、カメラ内でどのくらいの温度勾配がありうるか考える。CTA 大口径望遠鏡のカメラ内は、冷 却システムによりカメラ内の温度を 20±1~2 で制御される予定である。冷却システムは、MAGIC 望 遠鏡の方式を採用したカメラ内パイプを通し、その中に水を流すことでカメラ内の温度を下げる仕組 みである。しかし、カメラ内を一様に温度制御するのは不可能であるため、温度勾配は十分ありうる。

まず、平均値は cell によらない量であるため、チェレンコフ光の信号がのっていない cell の電圧からオフセットを見積もってそれを差し引くことで温度の影響はキャンセルされる (図 60)。次に、温度変化の分散について考える。各 cell の温度依存性は信号の積分値 f に影響するはずだが、影響の度合いを見積もるため、まずはランダムノイズによる影響を計算してみる。DRS4 チップのランダムノイズは  $0.35 \text{mV}_{rms}$  である。ノイズの積分量 f とすると、

$$f = \sum_{i}^{n} V_{i}t \tag{39}$$

$$df^{2} = d\sigma_{0}^{2} + d\sigma_{1}^{2} + d\sigma_{2}^{2} + \dots + d\sigma_{n}^{2}$$
(40)

$$d\sigma_0 = d\sigma_1 = d\sigma_2 = \dots = d\sigma_n = 0.35 [\text{mV-nsec}]$$
(41)

$$df = \sqrt{n}d\sigma \tag{42}$$

と表される。ただし、V はオフセット電圧 [mV]、n は cell 番号、 $d\sigma$  はランダムノイズによる 1 cell あ たりの信号の積分量、t は時間 bin であり、今はサンプリング速度を 1 GHz としているので、t = 1 nsec となる。今、4 nsec の積分区間でチェレンコフ光の光量を見積もるとすると、これらの式からランダム ノイズによる不定性は、

$$0.35 \times \sqrt{4} = 0.7 [\text{mV-nsec}] \tag{43}$$

となる。一方、温度変化の分散による変化量は大きくてもせいぜい、

$$0.02031 \times 4 \sim 0.08 [mV \cdot nsec]$$
 (44)

となる。式 (43)、(44) より、分散によるチェレンコフ光の光量のばらつきは、ランダムノイズによる 不定性より小さいため、分散の影響は無視できる。





図 60: オフセットの解析の概念図 (各 cell の分 散が小さい場合)

図 61: オフセットの解析の概念図 (各 cell の分 散が大きい場合)

次に、ゲインについて考える。ゲインは解析の結果、各 cell の温度変化率の平均は、 $-0.1949 \times 10^{-3}$ [/]であり、分散は  $1.619 \times 10^{-5}$ [/]という結果が得られた。ゲインの解析結果についても信号の積分量の不定性、即ち、ガンマ線のエネルギー不定性に対する影響を考察する。チェレンコフ光の光量はガンマ線のエネルギーにほぼ比例する。CTA におけるガンマ線のエネルギー分解能の要求は、分解能が一番良い領域である 10TeV において、およそ 5% であるため、この値とゲインの温度変化率によるエネルギー不定性を比較する。ゲインの温度変化を 10 と仮定すると、ゲインは  $1.949 \times 10^{-3} \pm 1.619 \times 10^{-5}$ 変化する。変化率の分散は平均値に比べ非常に小さいので、平均値の影響のみを調べれば良い。ガンマ線のエネルギーは、チェレンコフ光の総量、信号の積分値に比例する。そして、ゲインは信号の積分値に比例するため、ガンマ線のエネルギーにも比例することになる。ここで、ガンマ線の元のエネルギーを E, ガンマ線のエネルギー不定性を  $\Delta E$ とする。また、ゲインを G(カメラ内の温度と同じ 20 のとき), ゲインの不定性を  $\Delta G$ , 温度変化を  $\Delta T$ とする。このとき、

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{\Delta G}{G} = \frac{1}{G} \frac{dG}{dT} \Delta T$$
$$= \frac{1}{0.916} \times 1.949 \times 10^{-3} [/] \times 10 [] \sim 0.21\% < 5\%$$
(45)

となるため、ゲインの不定性はガンマ線のエネルギーの不定性より十分小さいことが分かる。



図 62: ゲインの変化による信号の積分値の変化

最後に、タイミングについて考える。タイミングの積算値は解析の結果、各 cell の温度変化率の平均は、各 cell の平均は – 0.002251[nsec/]であり、分散は 0.00121[nsec/]である。タイミングにおいては 10 の温度変化における最大の時間変化を考える (~ – 0.0042±0.00121[nsec/])。この時間 変化は、ゲインと同様チェレンコフ光の積分量に関係する。時間積分区間を t(=4nsec とする),時間変化の不定性を  $\Delta t$  とすると、

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{4[\text{nsec}]} \times (0.0042 \pm 0.00121[\text{nsec}/]) \times 10[] \times 10[] \sim 1\% < 5\%$$
(46)

となる。つまり、時間変化はガンマ線のエネルギーの不定性より十分小さいことが分かる。



図 63: タイミングの変化による信号の積分値の変化

さらに、タイミングの温度依存性が Time gradient を用いた解析に与えうる影響を考える。Time gradient とは、チェレンコフ光の levent のがピクセルに到達したときの時間勾配のことである [21]。 Time gradient を用いると、ガンマ線の到来方向を位置情報だけでなく時間情報についても解析する ことができるため、ガンマ線の到来方向をより高い精度で決定することができる。Time gradient は 数 nsec 程度であるため、1nsec 以下の時間分解能が必要である。解析によって、DRS4 チップは 10 温度変化した場合、時間変化は大きくてもせいぜい 0.001nsec 程度であるという結果が得られたため、 Time gradient に与える影響は殆ど無視できる。

今回の解析結果から、DRS4 チップを実際に CTA 用の DRS ボードに実装して観測を行う上で、温度変化はキャリブレーションに組み込む必要がないことが分かった。

また、本研究の直接の目的ではないが派生的に分かったことは、タイミングのキャリブレーションの際、入力周波数を 25MHz としたが、入力周波数が遅いほど出力波形が歪むため、≳数 100MHz の入力が望ましいということである (ただし、要求仕様と比較すると 25MHz でも差し障りはない。)
#### 7 まとめ

本研究では、次世代地上チェレンコフ望遠鏡 CTA のカメラに用いるアナログメモリ DRS4 チップ の電圧とタイミングのキャリブレーションの方法の調査、及びチップの各 cell のキャリブレーション パラメータの温度特性を評価した。

キャリブレーションの方法を調査する際、まず、DRS4 チップの特性を知るための最小限の回路だ けが付いた DRS4 評価ボードを用い、それを動作させるためのライブラリを解読した。そして、それ を拡張して、オフセット、ゲイン、タイミングのキャリプレーションパラメータを読み出す関数群を 作成した。さらに、恒温槽を用いてオフセット、ゲイン、タイミングの温度特性評価を行った。

解析の結果から、DRS4 チップは、CTA によるガンマ線観測においては温度依存性の影響は無視で きるほど小さいことが分かった。そのため、DRS4 チップは各 cell の個性を考慮しても温度に対して キャリブレーションパラメータの変動が小さいため、温度依存性を考慮したキャリブレーションは必 要ないという結果が得られた。

## 付録 A 本文中で使用した関数群

\* int DRSBoard::GetWave(unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float \*wave form) : キャリプレーションされた波高値を取得する。

\*int DRSBoard::GetWave(unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float \*wave
form, bool responseCalib,

int triggerCell, int wsr, bool adjustToClock, float thresh
old, bool offsetCalib)

\* int DRSBoard::GetWave(unsigned char \*waveforms, unsigned int chipIndex, unsigned char channel,

short \*waveform, bool responseCalib, int triggerCell, int

wsr, bool adjustToClock,

float threshold, bool offsetCalib)

\* int DRSBoard::CalibrateVolt(DRSCallback \*pcb) : 電圧のキャリプレーションを行う。

\*int DRSBoard::CalibrateTiming(DRSCallback \*pcb) : 時間のキャリプレーションを行う。

\* int DRSBoard::AnalyzeWF(int nIter, float wf[kNumberOfBins], int tCell, double ce

llT[kNumberOfBins]) : int DRSBoard::CalibrateVolt(DRSCallback \*pcb)の中で呼ばれる時間のキャリプレーションを行う。

\* double DRSBoard::GetTemperature() : 評価ボードの温度を取得する。

\* int DRSBoard::SetInputRange(double center): 取得電圧の中心を決める。

\* int DRSBoard::GetStopCell(unsigned int chipIndex) : トリガーがかかる cell 番号を取得する。

# 付録 B 追加した関数群

```
* float GetCellOffsetmV(int i) : オフセットを mV 単位で取得する。
* double GetCellGain(unsigned int chipIndex, int i) : ゲインを取得する。
* int DRSBoard::GetRawWavemV(unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float
*waveform, bool adjustToClock): 波高値の生データを mV 単位で取得する。
以下はライブラリに書き加えたソースコードである。
class DRSBoard {
public:
float
            GetCellOffsetmV(int i) { return GetCellOffset(i)/65636.0*1000+(f
Range*1000-500);} ;
unsigned short GetCellOffset(int i) { return GetCellOffset(0, i); } ;
}
unsigned short GetCellOffset(unsigned int chipIndex, int i) { return fCel
10ffset[chipIndex][i]; } ;
/*-----*/
class DRSBoard {
public:
double GetCellGain(unsigned int chipIndex, int i) { return fCellGain[chipIndex][i]
float GetCellGain(int i) { return GetCellGain(0, i); } ;
}
/*-----*/
int DRSBoard::GetRawWavemV(unsigned int chipIndex, unsigned char channel, float *w
aveform, bool adjustToClock)
{
 int i, status;
 unsigned short wf[kNumberOfBins];
 status = GetRawWave(0, 0, wf, adjustToClock);
 for (i = 0; i < kNumberOfBins; i++){</pre>
   waveform[i] = wf[i]/65636.0*1000+(fRange-500);
   }
   return status;
```

## 付録 C 測定に使用する目的で作成したプログラム

#include <math.h>

#ifdef \_MSC\_VER

#include <windows.h>

#elif defined(OS\_LINUX)

#define O\_BINARY 0

#include <unistd.h>
#include <ctype.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include <errno.h>

#define DIR\_SEPARATOR '/'

#endif

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <iostream>
#include "strlcpy.h"
#include "DRS.h"
#include <fstream>
/*-----*/
int main(int argc, char *argv[])
ſ
  int i, j, nBoards;
  DRS *drs;
  DRSBoard *b;
  float time_array[1024];
  float rawwave_array[1024];
  unsigned short fStopCell[4];
  float temp;
  //// arguments, inirialization
  11
  float threshold=0.1;
  if (argc > 1) {
    threshold=atof(argv[1]); // in volt
  };
  11
  int nevent=10;
  if (argc > 2) {
    nevent=atoi(argv[2]);
  }:
  //
  char *fname="tmp.dat";
  if (argc > 3) {
```

```
fname=argv[3];
};
11
bool negative_edge=false; // true is negative
if (argc > 3) {
  if (argv[4]=="true") {
    negative_edge=true;
  };
};
//
float freq=2.; // sampling frequency (GHz)
if (argc > 4) {
 freq=atof(argv[5]);
};
std::ofstream fout;
fout.open(fname); // attention! file is truncated if the file fname already exists.
if (!fout.is_open()) {
  exit(1);
}
/* do initial scan */
drs = new DRS();
/* show any found board(s) */
for (i=0 ; i<drs->GetNumberOfBoards() ; i++) {
   b = drs->GetBoard(i);
   printf("Found DRS4 evaluation board, serial \#\%d, firmware revision \%d\n",
      b->GetBoardSerialNumber(), b->GetFirmwareVersion());
}
/* exit if no board found */
nBoards = drs->GetNumberOfBoards();
if (nBoards == 0) {
  printf("No DRS4 evaluation board found\n");
  return 0;
}
/* continue working with first board only */
b = drs->GetBoard(0);
//* temperature *//
temp = b->GetTemperature();
/* initialize board */
b->Init();
/* set sampling frequency */
b->SetFrequency(freq, true);
/* enable transparent mode needed for analog trigger */
b->SetTranspMode(1);
/* set input range to -0.05V ... +0.95V */
b->SetInputRange(0);
/* use following lines to enable hardware trigger on CH1 at 250 mV positive edge */
                                     // lemo off, analog trigger on
b->EnableTrigger(0, 1);
                                     // use CH1 as source
b->SetTriggerSource(0);
b->SetTriggerLevel(threshold, negative_edge); // -0.05 V, negative edge
```

```
b->SetTriggerDelay(0);
                                   // zero trigger delay, this places pulse in
  /* temperature */
  std::cout << "temp" << temp << std::endl;</pre>
  fout << "%" << " " << "time_array" << " " "rawwave_array" << " " << "fstopcell" << " " << "temp" << temp
<<std::endl;
  /* repeat nevent times */
  for (j=0 ; j<nevent; j++) {</pre>
    /* start board (activate domino wave) */
    b->StartDomino();
    /* wait for trigger */
    while (b->IsBusy());
    /* read all waveforms */
     b->TransferWaves(0, 8);
     /* read time (X) array in ns */
     b->GetTime(0, time_array, true, false);
     /* trigger cell*/
     fStopCell[0] = b-> GetStopCell(0);
     /* decode rawwaveform (Y) array first channel in mV */
     b-> GetRawWavemV(0, 0, rawwave_array,true);
     for (i=0;i<1024;i++) {</pre>
      fout << time_array[i] << " " << rawwave_array[i] << " " << fStopCell[0] << std::endl;</pre>
     }
  }
  fout.close();
  /* delete DRS object -> close USB connection */
  delete drs:
7
* drs_getOffset.cpp : キャリブレーションされていないオフセットを取得するプ
ログラム
#include <math.h>
#ifdef _MSC_VER
#include <windows.h>
#elif defined(OS_LINUX)
#define O_BINARY 0
#include <unistd.h>
#include <ctype.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include <errno.h>
#define DIR_SEPARATOR '/'
#endif
```

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <iostream>
#include "strlcpy.h"
#include "DRS.h"
#include <fstream>
/*-----*/
int main(int argc, char *argv[])
{
  int i, j, nBoards;
 DRS *drs;
 DRSBoard *b;
 float time_array[1024];
 float rawwave_array[1024];
 float temp;
  //// arguments, inirialization
  11
 float threshold=0.1;
  if (argc > 1) {
   threshold=atof(argv[1]); // in volt
 };
  //
  int nevent=10;
  if (argc > 2) {
   nevent=atoi(argv[2]);
  };
  //
  char *fname="tmp.dat";
  if (argc > 3) {
    fname=argv[3];
  };
  11
  bool negative_edge=false; // true is negative
  if (argc > 3) {
    if (argv[4]=="true") {
     negative_edge=true;
    };
  };
  11
  float freq=2.; // sampling frequency (GHz)
   if (argc > 4) {
   freq=atof(argv[5]);
  };
  std::ofstream fout;
  fout.open(fname); // attention! file is truncated if the file fname already exists.
  if (!fout.is_open()) {
    exit(1);
  }
  /* do initial scan */
  drs = new DRS();
   /* show any found board(s) */
  for (i=0 ; i<drs->GetNumberOfBoards() ; i++) {
```

```
b = drs->GetBoard(i):
 printf("Found DRS4 evaluation board, serial #%d, firmware revision %d\n",
b->GetBoardSerialNumber(), b->GetFirmwareVersion());
}
/* exit if no board found */
nBoards = drs->GetNumberOfBoards();
if (nBoards == 0) {
 printf("No DRS4 evaluation board found\n");
  return 0;
}
/* continue working with first board only */
b = drs->GetBoard(0);
/* temperature */
temp = b->GetTemperature();
/* initialize board */
b->Init();
/* set sampling frequency */
b->SetFrequency(freq, true);
/* enable transparent mode needed for analog trigger */
b->SetTranspMode(1);
/* set input range to -0.05V ... +0.95V */
b->SetInputRange(0);
/* use following lines to enable hardware trigger on CH1 at 250 mV positive edge */
b->EnableTrigger(1, 0);
                                      // lemo off, analog trigger on
b->SetTriggerSource(0);
                                      // use CH1 as source
b->SetTriggerLevel(threshold, negative_edge); // -0.05 V, negative edge
b->SetTriggerDelay(0);
                                      // zero trigger delay, this places pulse in
/* temperature */
std::cout << "temp" << temp << std::endl;
fout << "%" << " " << "time_array" << " " << "rawwave_array" << " " << "temp" << temp <<std::endl;</pre>
/* repeat nevent times */
for (j=0 ; j<nevent; j++) {</pre>
  /* start board (activate domino wave) */
  b->StartDomino();
  /* wait for trigger */
  while (b->IsBusy());
  /* read all waveforms */
  b->TransferWaves(0, 8);
  /* read time (X) array in ns */
  b->GetTime(0, time_array, true, false);
  /* decode rawwaveform (Y) array first channel in mV */
  b-> GetRawWavemV(0, 0, rawwave_array,true);
   for (i=0;i<1024;i++) {</pre>
fout << time_array[i] << "</pre>
                                " << rawwave_array[i] << std::endl;
   }
}
```

```
fout.close();
/* delete DRS object -> close USB connection */
delete drs;
```

}

#### 謝辞

まずは本研究を行うにあたり、数多くの方々からご指導、ご協力いただきましたことを深く感謝いたします。指導教官である吉田龍生教授には多岐にわたり、いつも丁寧にご指導をいただき、本当にありがとうございました。CTA-Japanのメンバーとして望遠鏡開発に携わるにあたり、片桐秀明准教授には研究面において解析方法など含め、多方面でご指導いただき、感謝しております。ありがとうございました。

研究室の同学年である井掛裕一さん、黒田和典さんには授業のレポートや研究面において色々相談 に乗っていただきました。また、M1の梅原克典君、加賀谷美佳さん、工藤智貴君、浜田大数君、福田 愛璃紗さんには、コンピュータの知識や、ソフトやエレキの面でサポートいただき、また、日々の生 活面のことなど色々話を聞いて下さいました。M2、M1揃ってお昼ご飯を食べるのは楽しい休息の時 間でした。今年の4年生の皆さんはよく研究室に足を運び、研究に力を注いでいました。研究室の皆 様とともに充実した楽しい研究生活を送ることができたことを、本当に嬉しく思います。

京都大学の窪秀利助教、青野正裕さん、物理学第二教室宇宙線研究室の皆様には大変お世話になり ました。お忙しい中、サポートをしていただき、ありがとうございました。

そして CTA-Japan の皆様からは沢山のアドバイスをいただき、感謝しております。ありがとうございました。

最後に2年間にわたり、日々の生活をサポートし、大学院で研究をさせてくれた両親に感謝いたし ます。本当にありがとうございました。

### 参考文献

- [1] http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/japanese/glossaryJ.html
- [2] http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/
- [3] http://magic.mppmu.mpg.de/
- [4] http://veritas.sao.arizona.edu/
- [5] http://www.kobe-wu.ac.jp/asakimori/cr/airshower.html
- [6] http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CTA/
- [7] http://drs.web.psi.ch/
- [8] http://apcauger.in2p3.fr/Public/Presentation/
- [9] http://www.cta-observatory.jp/
- [10] http://www.cta-observatory.jp/Internal/index.html (CTA member only)
- [11] http://www.sophia-it.com/content/Cockcroft-Walton+circuit
- [12] http://www.infonet.co.jp/ueyama/glossaly/bit.html
- [13] http://ndip.in2p3.fr/ndip11/AGENDA/AGENDA-by-DAY/Presentations/2Tuesday/PM/ID172-Shayduk.pdf
- [14] 小山勝二, 嶺重慎 [編]. 『ブラックホールと高エネルギー現象』 シリーズ現代の天文学 8. 日本評論社, 2007.
- [15] 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦 [編]. 『宇宙の観測 高エネルギー天文学』 シリーズ現 代の天文学 17. 日本評論社, 2008.
- [16] 渡邊靖志. 『素粒子物理学入門』 新物理学シリーズ 33. 培風館, 2002.
- [17] 手嶋政廣. 宇宙線研共同利用研究成果発表会, 2011, 12月.
- [18] 萩原亮太. 日本物理学会講演, 2011, 9月.
- [19] 粟根悠介. 日本物理学会講演, 2011, 9月.
- [20] 山本常夏. 日本物理学会講演, 2011, 9月.
- [21] Stamatescu, V., Rowell, G. P., Denman, J., et al. Astroparticle Physics, 34, 886, 2011.
- [22] Weekes, T.C., Phys. Rep., 160, 1, 1988.

- [23] J.A.Hinton & W.Hofmann. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 47, 523, 2009.
- [24] N.Tonello. Study of the VHE  $\gamma$ -ray emission from the Active Galactic Nucleus 1ES1959+650, Technischen Universität Münche PhD Thesis, 2006.
- [25] 的場峻司. 茨城大学大学院修士論文, 2008.
- [26] 水上拓. 京都大学大学院修士論文, 2007.
- [27] S.Watanabe. 京都大学博士論文, 2007.
- [28] 水村好貴. 東海大学大学院修士論文, 2008.