修士学位論文

次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA のための 分割鏡動的制御システムの開発

"Development of the Active Mirror Control System for the Next Generation Very High Energy Gamma-Ray Observatory CTA"

平成27年2月4日

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 吉越研究室 学籍番号 35136040

小島 拓実

概要

Cherenkov Telescope Array (以下、CTA) 計画は、現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡の 約10倍の感度と20GeVから100TeV以上という幅広い帯域での観測を行い、超高エネルギー 宇宙物理学の発展を目指す国際共同プロジェクトである。現在、約30ヶ国が参加し、各々の研 究機関でこの計画を成功させるため、研究・開発が行われている。CTA 計画では3種類の望遠 鏡を使い、超高エネルギーガンマ線を観測するが、その中で日本グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope; LST)の研究・開発を進めている。

LST は口径 23 メートルの望遠鏡で、主に 20GeV から 100GeV のエネルギーのガンマ線の観 測を担う。LST は 198 枚の六角形球面鏡(対辺長 1.5 メートル;以下、分割鏡)を放物面状に設 置し、28 メートル先の焦点面にチェレンコフ光を集める。また、あらゆる方向に 20 秒以内で 向くことを目標としており、LST の観測がガンマ線バーストのような突発的な現象の観測・研 究に大きな躍進をもたらすと期待される。この高速の方向転換を行うために LST では望遠鏡構 造体に carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP)を使って建設し、軽量化を目指す。しかし、高 速回転が望遠鏡の光学性能に影響を及ぼしてしまう可能性がある。特に望遠鏡主鏡を成してい る分割鏡それぞれの方向が、この高速回転によって本来とは異なる方向を向くと考えられてい る。この問題を解決することは、LST の観測感度に大きな利益をもたらす。

この解決案として考案されている方法が、ここで紹介する Active Mirror Control (AMC) シ ステムである。

望遠鏡主鏡に用いられる 198 枚の分割鏡には、それぞれ1台の CMOS カメラと2台のアク チュエータが設置されており、これらが AMC システムの根幹になる。望遠鏡主鏡中心からは 赤外線レーザーが望遠鏡の焦点面カメラの標的に向けて照射されている。分割鏡に取り付けた CMOS カメラは標的に当たったレーザーのスポットを撮像し、位置を求める。画角内のスポッ トの位置は分割鏡の方向に依存しており、分割鏡が異なる方向を向いた場合、それに応じてレー ザースポットの位置も変動する。この位置の変化を見ることで分割鏡の方向の変化量を求め、 補正量を決める。分割鏡の補正はアクチュエータで行う。CTA LST の AMC システムではレー ザースポットを 1.67 mm 以内で決定することを要求値としている。また、本論文では1枚の分 割鏡に対し1秒程度の時間で補正することを目標とした。

AMCのシステム運用はlinux で行われる。したがって、AMCシステムを行うシステムをlinux 用に開発しなければならない。AMCシステムは大別して3つのpartに分かれる。CMOSカメラ から画像を取得する "capture part"、取得した画像からレーザースポットを同定する "analysis part"、アクチュエータを動かす "actuator part"である。また、これらのpart を統一させ、同 ーのシステムとして、かつ1枚の分割鏡当り1秒程度の時間で運用しなければならない。

本論文では、プログラム開発と試験を行った。プログラム開発では、CMOS カメラの画像取 得プログラム、レーザースポット解析プログラム、アクチュエータ動作プログラムを開発した。 試験では、解析プログラムで得たレーザースポットの位置決定精度の試験を行い、1 σ = ~±0.1 ピクセル(=3/10 mm)の精度で決定できることを確かめた。アクチュエータ動作試験では、開 発プログラムでアクチュエータを 10000 回動かし正常に動作することを確かめた。ボード PC 上での試験では、実際の運用で使用するボード PC 上で開発プログラムを走らせ、capture part に~200 ms、analysis part に~1.5 ms、actuator part に~900 ms の時間を要することを確かめ た。3 つの part を合わせた試験では、CMOS カメラの画角とアクチュエータの位置の対応関係 をキャリブレーションし、開発プログラムを試験した。結果、ほとんどの場合で 2 回の補正動 作で分割鏡の位置を補正することに成功した。

この結果から、レーザースポット位置の決定精度については要求性能を十分に満たし、分割 鏡の方向を要求性能未満の精度で補正することができることを確かめた。しかし、1枚の分割 鏡に対する1回の補正時間は1秒を下回らなかった。よって補正プログラムをより最適化し、 動作時間を短くする必要がある。また、1回の補正で分割鏡の方向を正しく補正できなかった。 このことから、レーザースポットからアクチュエータの移動量を計算する部分に改善できる部 分があると考えられる。これらを修正することでより精度よく、かつ少ない時間で分割鏡の方 向を補正できると思われる。 目 次

1	序論	î 1						
	1.1	研究の背景 1						
	1.2	本研究の目的と概要 2						
2	高工	ネルギー天体物理学 3						
_	2.1	宇宙線物理学						
	2.1	911 宇宙線の発見 3						
		21.1. 1 出版ジルル						
	$\mathcal{O}\mathcal{O}$	2.1.2 丁田林のバイン「アー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・						
	2.2 9.2	同二小ルイ ガン、称八丈士の幌安 真r文ルギーガンフ娘の抜射機構						
	2.5	同二个/Vイニルンマ脉の加別機構 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
		2.3.1 前期放射						
		2.3.2 シンクロトロン放射						
		$2.3.3$ $\overline{\overline{U}}$ $\overline{\overline{U}$ $\overline{\overline{U}}$ $\overline{\overline{U}}$ $\overline{\overline{U}}$ $\overline{\overline{U}}$ $\overline{U$						
		2.3.4 シンクロトロン-目己コンプトン放射						
		$2.3.5$ π 崩壊						
		2.3.6 対消滅ガンマ線 8						
	2.4	高エネルギーガンマ線の放射天体						
		2.4.1 超新星残骸						
		2.4.2 パルサー 10						
		2.4.3 パルサー星雲 10						
		2.4.4 ガンマ線連星 11						
		2.4.5 活動銀河核 12						
		2.4.6 ガンマ線バースト 12						
3	解像型大気チェレンコフ望遠鏡 15							
	3.1	大気中の超高エネルギーガンマ線の反応						
	0.1	311 空気シャワー 15						
		312 チェレンコフ光 16						
	32	地上での招高エネルギーガンマ線観測 17						
	0.2	391 大気チェレンコフイメージング法 17						
		3.2.2 ステレオ観測法 18						
4	Che	erenkov Telescope Array (CTA) 計画 20						
	4.1	CTA 計画の概要 20						
		4.1.1 目標性能						
		4.1.2 観測サイト 22						
		4.1.3 望遠鏡						
	4.2	Large-Sized Telescope $\circlearrowright \neg \lor \lor \land \land$						
		4.2.1 焦点面カメラ 24						
		4.2.2 ライトガイド 24						
		4.2.3 構造体						

		$4.2.4 \exists \overline{2} - \ldots $	24				
5	Active Mirror Control (AMC)の開発 28						
	5.1	AMC で想定される問題	28				
	5.2	CTA LST における AMC システムの概要......................	28				
	5.3	AMC の要求精度	32				
	5.4	宇宙線研究所にある分割鏡・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32				
6	\mathbf{AN}	ICに関するソフトウェア開発	37				
	6.1	CMOS カメラに関するプログラム	37				
		6.1.1 使用する CMOS カメラ	37				
		6.1.2 aravis ~linux 用ライブラリ~	39				
		6.1.3 画像取得プログラム	40				
	6.2	レーザースポット解析	41				
		6.2.1 想定される BG	41				
		6.2.2 レーザースポット同定方法	42				
		6.2.3 用いる解析手法	42				
	6.3	アクチュエータ操作用プログラム開発	44				
		6.3.1 LST アクチュエータ	44				
		6.3.2 先行研究	45				
		6.3.3 先行研究からの変更点	47				
		6.3.4 補正量計算	48				
		6.3.5 開発プログラム	50				
	6.4	その他の AMC 装置	51				
		6.4.1 赤外線レーザー	51				
		6.4.2 CMOS カメラのケース	51				
		6.4.3 $\overrightarrow{\pi}$ + \overrightarrow{F} PC	51				
		6.4.4 PoEハブ	52				
		6.4.5 AMC ボックス	52				
		6.4.6 温湿度計	52				
7	開発	ミプログラムの性能評価	57				
	7.1	CMOS カメラによるレーザースポット認識	57				
	7.2	CMOS カメラ及びレーザースポット解析のテスト	58				
	7.3	LST $\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}\mathcal{P}$	60				
	7.4	ボード PC 上でのプログラムに要する時間測定	61				
	7.5	CMOS カメラの画角とアクチュエータ軸の対応関係の測定	64				
	7.6	補正プログラムの動作試験	68				
		7.6.1 スボット決定範囲 0.5 ビクセル	68				
		 7.6.1 スポット決定範囲 0.5 ピクセル 7.6.2 スポット決定範囲 0.1 ピクセル 	68 69				

8 結論

結論				
8.1	AMC システム開発のまとめ	74		
8.2	今後の展望	74		

1 序論

1.1 研究の背景

宇宙には、地球上では存在しえないような高エネルギーの天体現象が多く存在する。それら の天体現象は、宇宙空間に高エネルギーの粒子や電磁波を放射し、その一部が地球まで到来す る。宇宙から飛来する宇宙線や電磁波を観測することは、それらを放射する天体現象の物理や 到来するまでに通過する宇宙空間の情報を知るうえで、非常に重要である。

宇宙線は、その多くが陽子や原子核などの荷電粒子であり、宇宙空間の磁場によって方向が 曲げられ発生源の情報の多くを失ってしまう。発生源の情報を入手するには、中性粒子や電磁 波などを観測しなければならない。その中でも高エネルギーガンマ線は、高エネルギー天体現 象と深く結びついており、これを観測することは宇宙線の起源や加速機構の謎を解明する重要 な手掛かりとなる。

これまでいくつものガンマ線観測が行われ、宇宙線物理学に重要な貢献をしてきた。宇宙ガ ンマ線はエネルギー領域によって、MeV ガンマ線、GeV ガンマ線、TeV ガンマ線に大別され、 異なる手法で観測が進められている。特に TeV ガンマ線は超高エネルギーガンマ線と呼ばれ、 その観測手法はガンマ線が大気を通過する過程において放射するチェレンコフ光を用いた、大 気チェレンコフイメージング法が主流となっている。この手法を用いた望遠鏡を一般に「解像 型大気チェレンコフ望遠鏡」と呼んでいる。1989年、Weekes らが 10 m 口径の大気チェレンコ フ望遠鏡を用いてかに星雲からの TeV ガンマ線を観測して以来、大気チェレンコフ望遠鏡の活 躍で TeV ガンマ線天文学は急速に発展した。この方法から超新星残骸 RX J1713.7-3946 からの TeV ガンマ線を観測し、超新星残骸が TeV 宇宙線の加速源の一つであることを観測的に証明し たことは、大気チェレンコフ望遠鏡が宇宙線物理学にもたらした重要な貢献の一つである。こ のように TeV ガンマ線天文学は大気チェレンコフ望遠鏡と共に発展してきたが、さらに感度を 向上させ、宇宙線や高エネルギー天体現象に関する謎を解明しようとする計画が考案されてい る。それが、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画である。

CTA 計画は、世界中の大学・研究機関が集い超高エネルギーガンマ線天文学の発展を目指す 国際共同プロジェクトである。現行の大気チェレンコフ望遠鏡の10倍の感度と、20GeVから 100TeV以上のエネルギー帯域の観測を目標としており、CTA による観測によって1000を超え るTeVガンマ線天体が見つかると予想されている。CTA 計画では口径の異なる3種類の望遠鏡 を用いて、幅広いエネルギー帯域を観測する。それぞれ大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope; LST)、中口径望遠鏡(Mid-Sized Telescope; MST)、小口径望遠鏡(Small-Sized Telescope; SST)と呼ばれており、これらを南北2サイトに設置する。日本グループは、主にLSTの開発 に携わっており宇宙線研究所が中心となって研究が進められている。LST は主鏡の口径が23 m、重さ50-100トンになるとされ、3つの望遠鏡の中では最も巨大なものとなる。これを南北 それぞれに4台設置し、数十GeVから数TeVを主に観測する。また、ガンマ線バーストなど の突発的な天体現象の観測を行うため、LST は全天のあらゆる方向に対して20秒以内で向く ことを目標としている。つまり半回転を20秒で行うということであり、その際に望遠鏡機器に 与える影響は決して小さくない。精度の良い観測を行うため、開発段階からそれらを考慮しな くてはならない。

LSTの主鏡は、198枚の六角形球面鏡(分割鏡)を放物面状の構造体に設置することで作られる。分割鏡を設置する構造体には炭素繊維強化プラスチック(carbon-fiber-reinforced plastic; CFRP)が用いられ、同様の構造体を鉄で作った時よりも23%の重さに抑えられている。この

1

ように重さを抑えることにより、全天に20秒以内に向くという目標を達成しようとしている。 しかし、この高速回転により望遠鏡構造体に歪みが生じてしまうと考えられている。この歪み が大きくなれば望遠鏡主鏡の放物面の精度、ひいては望遠鏡感度に悪影響を及ぼしてしまう。こ の放物面の歪みを補正するシステムとして考案されているのが、本研究のテーマである "Active Mirror Control (AMC)"システムである。

1.2 本研究の目的と概要

精度の良い観測のために、望遠鏡主鏡の放物面精度をリアルタイムで補正する必要がある。 本論文の目的は、Active Mirror Control (AMC)システムの制御プログラムを開発し、それが 実用可能であるかの模擬実験を行い評価することである。

第2章では、CTAで測定する超高エネルギーガンマ線の発生機構と放射天体を紹介する。第 3章では、大気チェレンコフ望遠鏡に用いられる観測手法について紹介する。第4章では、CTA 計画の概要について説明する。第5章では、CTA 計画に用いる AMC システムについて、その 構想と手法について説明する。第6章では、AMC システムに用いる装置と開発プログラムに ついて述べる。第7章では、装置や開発したプログラムを用いた実験の説明と測定結果につい て述べる。第8章では、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2 高エネルギー天体物理学

ここでは、宇宙線物理学と高エネルギーガンマ線天文学の概要を紹介する。

2.1 宇宙線物理学

宇宙線とは、宇宙を飛び交う高エネルギーの荷電粒子のことである。宇宙線の主要成分は陽 子であり、非熱的な加速過程を経てエネルギーを与えられると思われている。宇宙線を研究す ることは、宇宙での粒子の加速機構や高エネルギー現象を解明する鍵となり、宇宙物理学の発 展につながる。宇宙線が最初に発見されてから、これまでに様々な観測実験が行われてきた。

2.1.1 宇宙線の発見

1912年、オーストリアの物理学者ヴィクトール・フランツ・ヘスは、自然放射線と高度の関係を調べるため放射線検出器を気球に乗せ4000 m の高度で放射線の強度を調べる、気球観測 実験を行った(図1)。すると高度1000 m を過ぎたころから、上昇するほど放射線強度が強く なっていった。宇宙線の発見である。この荷電粒子はアメリカの物理学者ロバート・ミリカン によって「cosmic rays」と名づけられ、精力的に研究がすすめられた。

地球緯度の違いによる宇宙線強度の観測がなされた。宇宙線が中性粒子であれば緯度の違い からくる地球磁場の影響を受けないと考えられた。結果として緯度によって宇宙線強度は変化 し、荷電粒子であることとなった。また地球の磁力線に対し、正の電荷を持つ宇宙線は西から、 負の電荷を持つ宇宙線は東から到来すると予測され観測がなされた。結果、西から到来する放 射線が多いことが分かり、宇宙線は正の電荷を持つものが多いとされた。この結論は「宇宙線 の東西効果」と呼ばれている。

以上のような宇宙線研究がすすめられた。宇宙線研究は宇宙線分野だけではなく、他分野の 物理にも大きな影響をもたらした。陽電子やミューオンの発見は宇宙線研究が物理学にもたら した偉大な貢献の一つであり、その後の素粒子物理学の発展にもつながった。今日でも、宇宙 線物理学は天文学や基礎物理学の発展の一翼を担っている。

2.1.2 宇宙線のスペクトル

宇宙線は宇宙から定常的に降り注いでおり、エネルギーの約-3乗のべき型スペクトルを持つとわかっている(図2)。宇宙線のエネルギーは10²⁰eVにまで到達し、人工の加速器のエネルギー(10¹³eV)をはるかに上回る。

宇宙線粒子の組成はエネルギーによって異なるが、主成分は陽子となっていることが多い。 全体を通して見ればエネルギーの約 –3 乗のべき型スペクトルとなっているが、~4×10¹⁵eV 付近で勾配が急になり、~8×10¹⁸eV 付近で再び勾配が緩やかに戻っている。この領域はそれ ぞれ "knee"領域、"ankle"領域と呼ばれている。少なくとも knee 領域までの宇宙線は銀河系内 起源と信じられており、ankle 領域の勾配の変化は銀河系内起源の宇宙線と銀河系外起源の宇宙 線が混在しているためと考えられている。また、10²⁰eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線は2.7 K の宇宙背景光と相互作用をしてパイオンを生成することで、エネルギーを失ってしまう。こ の効果は "GZK カットオフ"と呼ばれており、その平均自由行程は10 Mpc 程度となる。しかし



図 1: 宇宙線を発見した気球観測実験(左)と気球に乗るヘス。 [15]

銀河系内には、このエネルギー領域の宇宙線起源は観測されていない。そのため銀河系外起源 と考えられており、現在観測が進められている。

このように、今日までに様々な研究や観測が行われ、宇宙線物理の謎を解明してきた。しか し、宇宙線の起源や化学組成など、いまだ詳しくわかっていない点は多い。それらの謎を解明す るため、現在も様々な観測実験が行われている。高エネルギーガンマ線観測もその一つである。

2.2 高エネルギーガンマ線天文学の概要

宇宙線は荷電粒子のため、宇宙空間に存在する磁場の影響を受けて、方向を変えてしまう。 そこで磁場の影響を受けない、電気的に中性の粒子や電磁波の観測が重要になってくる。その 中でも、高エネルギーのガンマ線は宇宙の非熱的な現象から放射され、宇宙線加速と関連した 現象であると言える。この高エネルギーガンマ線を観測することにより、宇宙線の加速機構や 宇宙の高エネルギー現象の解明を目指す学問が、「高エネルギーガンマ線天文学」である。

高エネルギーガンマ線天文学は近年、発展してきた学問である。ガンマ線天文学自体の歴史 は古く、1952年には早川幸男が宇宙線相互作用からガンマ線を予測している。1967年のOSO-3 衛星を皮切りに様々な人工衛星がガンマ線観測を行ってきた。今日では2008年打ち上げられた Fermi衛星の活躍により、1000を超えるGeVガンマ線天体が発見され(図3)、高エネルギー ガンマ線天文学の発展につながった。

TeV ガンマ線については、1989 年に Whipple 望遠鏡がチェレンコフイメージング法を用い て、かに星雲からの TeV ガンマ線を観測した。これが大気チェレンコフ望遠鏡を用いた最初の 観測で、その後 HEGRA、CANGAROO などの大気チェレンコフ望遠鏡が作られ、TeV ガンマ 線天文学を発展させた。今日では、HESS、MAGIC、VERITAS などのチェレンコフ望遠鏡が TeV ガンマ線をけん引している。TeV ガンマ線天体はおよそ 100 程度の天体が発見されている が (図 4)、この数字は観測感度に依るものと言われており次世代の望遠鏡として Cherenkov



図 2: 宇宙線のエネルギースペクトル。 [19]

Telescope Array 計画が考案されている。この計画が成功すれば、1000 を超える TeV ガンマ線 天体が発見されると言われ、高エネルギーガンマ線天文学の大きな躍進につながると考えられ ている。

2.3 高エネルギーガンマ線の放射機構

高エネルギーガンマ線はそのエネルギーの高さゆえ、主に非熱的な放射機構によって放射される(図5)。その放射機構は主に電子由来のものと陽子由来のものに大別される。電子由来の 放射は制動放射、シンクロトロン放射と逆コンプトン放射が主要な発生機構となる。陽子由来 の放射は陽子同士の衝突で生成されたπ粒子の崩壊ガンマ線が主な発生機構となる。

2.3.1 制動放射

荷電粒子が荷電理粒子によって作られる電場により加速度運動をすると、電磁波を放射する。 これを制動放射という(図5)。

相対論的電子が密度Nの物質中に入射する場合を考える。このとき粒子が単位時間当りに失うエネルギー *dE*/*dt* は



図 3: GeV ガンマ線で見つかっている天体。下表は天体の種類。 [20]



図 4: TeV ガンマ線で見つかっている天体。右表は天体の種類。 [21]



図 5: 主要なガンマ線発生機構。 [18]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{Z(Z+1.3)e^6N}{16\pi^3\epsilon_0^3m_e^2c^4\hbar}E[ln(\frac{183}{Z^{1/3}}) + \frac{1}{8}]$$
(1)

で与えられる。ここで Ze は媒体の電荷である。式からわかる通り、制動放射で失うエネル ギーは入射粒子のエネルギーに比例する。

2.3.2 シンクロトロン放射

荷電粒子が一様な磁場中を通過したとき、粒子はローレンツ力によりらせん運動を行い、粒子は電磁波を放射する。これをサイクロトロン放射という。このとき荷電粒子の速度 v が光速 c に近づくと、エネルギーや角度分布が変化してくる。この場合を特にシンクロトロン放射といい、サイクロトロン放射と区別される。

シンクロトロン放射は相対論的ビーミング効果によって速度方向に強い放射を放つ(図5)。 そのため観測者からは粒子が観測者側に向かっている短い時間のみ強い放射が見える。この放 射で単位時間当りに放出されるエネルギーは

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_t c U_{mag} \gamma^2 \beta^2 \tag{2}$$

ここで σ_t はトムソン断面積、 U_{mag} は磁場のエネルギー、 γ はローレンツ因子、 β はv/cとなる。

2.3.3 逆コンプトン散乱

宇宙空間を走る相対論的電子は宇宙背景光(2.7 K)や銀河系外背景光(星の光など)を散乱 させ、光子にエネルギーを渡すことがある。これを逆コンプトン散乱という。

いまエネルギー密度 U_{rad}の輻射場を考える。光子のエネルギーが電子のエネルギーよりも十分に小さいとき、反応断面積はトムソン散乱断面積を利用でき、単位時間当りに放出されるエネルギーは

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_t c U_{rad} \gamma^2 \beta^2 \tag{3}$$

となる。

2.3.4 シンクロトロン-自己コンプトン放射

高エネルギーガンマ線の放射機構として、シンクロトロン放射と逆コンプトン放射を合わせ たシンクロトロン-自己コンプトン放射 (Synchrotron Self-Compton Radiation, SSC) というも のが考えられている。これは電子がシンクロトロン放射をした光子を、同一加速源で生成され た電子が逆コンプトン散乱をして、さらに高いエネルギーを与える、というものである。

2.3.5 *π*崩壊

発生源で放射された陽子は宇宙空間の陽子あるいは原子核と衝突し、パイオンを生成する。

$$p + p \rightarrow \pi^0 + X$$
 (4)

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$
 (5)

このうち π^0 は8.4×10⁻¹⁷sの寿命を経て、2本のガンマ線に崩壊する。1本のガンマ線のエネルギーは陽子のエネルギーの10%程度になる。

2.3.6 対消滅ガンマ線

ガンマ線が電子を対生成するのと同様に、荷電粒子はその反物質と対消滅をしてガンマ線を 放射する。

$$e^+ + e^- \to 2\gamma \tag{6}$$

運動量保存則から、2本のガンマ線が放射される。主要な反応は電子と陽電子の対消滅から のガンマ線だが、陽子-反陽子などからも放射される。

2.4 高エネルギーガンマ線の放射天体

前述のような機構で高エネルギーガンマ線は放射される。高エネルギーガンマ線を放射する 天体や現象も高いエネルギーを持つことが多い。



図 6: 超新星残骸 RX J1713.7-3946 からのガンマ線(H.E.S.S.; カラー)と X 線(ASCA; ライン)。[1]

2.4.1 超新星残骸

超新星残骸(Supernova Remnant; SNR)とは、星が超新星爆発を起こした後に残る星雲上の構造である(図6)。超新星爆発の際、星成分を吹き飛ばすため衝撃波が起き、銀河系内宇宙線の重要な加速源の一つと思われている。

超新星爆発は太陽の3倍以上の恒星が寿命を迎え崩壊する現象である。若い恒星の主要な成 分は水素だが、核融合が進むにつれHe、C、Oなど質量数の大きい粒子になっていく。最終的 にFeまで到達するとそれ以上核融合をしなくなり、恒星内部の密度が非常に高くなる。恒星内 部の構造が自重に耐えられなくなると、内部は押しつぶされ重力エネルギーが解放される。そ の際、恒星内部は中性子星やブラックホールになり、恒星外部のガスは重力エネルギーによっ て吹き飛ばされる。これが超新星爆発である。この際、超新星爆発の衝撃波によって星間物質 や噴出物が加熱され、電磁波を放つ。これがSNRである。

SNRは、銀河系内宇宙線の加速源の一つであると言われている。超新星残骸 SN1006 からの シンクロトロンX線をX線天文衛星「ASCA」が観測し、SNR が宇宙線電子の加速源であるこ とが観測的に証明された。またガンマ線天文学においても、超新星残骸 RX J1713.3-3946 など 複数の SNR から TeV ガンマ線を観測され、TeV 領域まで宇宙線粒子が加速されていることが 分かった。ただし、それらが電子由来のガンマ線か陽子由来のガンマ線であるかはわかってお らず、さらに発展した研究が求められている。



図 7: かにパルサーからのスペクトル。[2]

2.4.2 パルサー

パルサーとは、高速回転する磁化した中性子星のことである。その回転周期に応じてパルス 的な放射を放射する。放射される電磁波は電波からガンマ線まで広い波長域にわたる。

パルサーは10¹¹-10¹⁴Gという強力な表面磁場を有しており、その磁気圏内で粒子加速を起 こす。その粒子加速、放射領域について、パルサーの極冠部分(Polar-Cap model)、磁気圏内 部の外側部分(Slot-Gap model、Outer-Gap model)の3つがあった。これらのモデルの違い として、磁場強度に依存する電子対生成の光学的厚みの違いから来る、10 GeV 付近でのスペ クトルのカットオフがある。Slot-Gap model、Outer-Gap modelの2つは Polar-Cap model に 比べ、穏やかなカットオフを持つことになる。近年、MAGIC 望遠鏡がかにパルサーからの25 GeV 以上の帯域でのパルスを初めて観測した(図7)。それに続き、Fermi 衛星が低エネルギー 側のガンマ線からから20 GeV までのスペクトルを観測した。このことからカットオフが穏や かであることが分かり、放射領域がパルサー磁気圏の外側部分であることが明白となった。

2.4.3 パルサー星雲

パルサーが解放するエネルギーの内、その大部分は磁気圏内でつくられた電子陽電子プラズ マからなる相対論的赤道風として放出される。この赤道風を「パルサー風」と呼ぶ。パルサー 風は衝撃波を経て内部エネルギーを獲得し、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱で輝く。 この天体を「パルサー星雲」という。パルサー星雲はTeV ガンマ線でもっとも観測されている 天体の一つである。高エネルギーガンマ線を放射するパルサー星雲としては、かに星雲が有名 であり、ガンマ線観測望遠鏡ではかに星雲から放射されるガンマ線の何%まで観測できるかと いうのが、望遠鏡性能を示す一つの指標となっている(図8)。

SNRのエネルギー源である超新星爆発に比べ、パルサー星雲のエネルギー源であるパルサー



図 8: かにパルサーとその周囲のかに星雲の可視光イメージ。[22]

のエネルギーは非常に小さい。にもかかわらず、TeV ガンマ線でよく観測される。これはパル サー星雲が天然の加速器として非常に効率の良く高エネルギー粒子を生成し、TeV ガンマ線を 放射しているためと考えられている。そのことから、TeV ガンマ線天体のうち、多波長で観測 されていない "TeV 未同定天体"の正体ではないか、と考えられている [11]。

2.4.4 ガンマ線連星

連星とは2つの天体が両者の重心を中心に公転している天体系のことであり、様々な波長域 で発見されている。ガンマ線でも5つの天体が連星系として見つかっており、いずれもブラッ クホールもしくはパルサーと大質量星の連星である(図9)。

ブラックホールからなるガンマ線連星は、マイクロクエーサーと呼ばれておりクエーサーを 小型化したような構造を持っている。これまでマイクロクエーサーからの明確なガンマ線は観 測されていないが、これが観測されること、さらに多波長観測から中心がブラックホールであ るという確証を得られれば、恒星質量ブラックホールの放射機構の理解につながる。また、ク エーサーの小型版ということから、遠方銀河での現象であるクエーサーの詳細な物理現象をマ イクロクエーサーから調べることができると思われている[11]。

パルサーからなるガンマ線連星は連星パルサーと呼ばれ、大質量星からの恒星風とパルサー 風の相互作用によってガンマ線を放射すると考えられている。連星パルサーの観測はパルサー 風の構造や大質量星の恒星風の構造の理解につながると考えられている[11]。



図 9: ガンマ線連星のイメージ画像。左:マイクロクエーサー、右:連星パルサー。[11]

2.4.5 活動銀河核

活動銀河核(Active Galactic nucleus; AGN)は、宇宙で最も明るく輝いている天体であり、 その正体は太陽の 10⁸⁻⁹ 倍の質量を持つ超巨大ブラックホール(Super-Massive Black Hole; SMBH)であることが分かっている。SMBHは観測される方向によって、クエーサー、ブレー ザーなどの名称で呼ばれている。その中でも、ブレーザーは相対論的ジェットが観測者方向に 向いているものを差し、相対論的ビーミング効果によりジェットが輝いて見える。その放射は 電波からガンマ線まで幅広い帯域で観測されている(図 10)。

銀河系外の TeV ガンマ線天体の多くはブレーザー天体で、AGN の放出する相対論的ジェット 中で生成される粒子によってガンマ線が放射されるが、ジェットの生成機構やガンマ線を放射 する粒子の組成についてなど、知られていない点は多くある。

AGNの放射領域は、観測結果からかなり小さいと推定されており、ブラックホール近傍に存在すると考えられている。高い時間分解能でガンマ線観測の行うことができれば、AGNのさらに詳細な物理を探ることができる。

2.4.6 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト(Gamma-ray Burst; GRB)とは、10⁵³ergという膨大なエネルギーが数 秒から数十秒の内に解放される、宇宙最大の爆発現象である。これまでのGRB研究から、宇 宙論的距離で発生していること、継続時間が2秒以下のもの(Short-GRB)とそれ以上のもの (Long-GRB)で系統的に性質が異なること、Long-GRBは大質量星の崩壊時に起きること、超 相対論的ジェット流出が引き金になっていること、衝撃波形成と高エネルギー電子加速を通じ電 波からX線にかけての幅広い帯域で数日以上かけて減光していく残光放射があることがわかっ ている。しかし、その正体や超相対論的ジェットの形成機構や組成、粒子加速やガンマ線放射 機構などわかっていない点は多い。

現在、高エネルギーガンマ線の地上観測でGRB は見つかっておらず、もし観測することが



図 10: 典型的なブレーザースペクトル。 [3]



図 11: ガンマ線バーストの模式図。 [12]

できれば、衛星観測以上の統計量を得ることができ、GRBの時間変動などを詳しく調べることができると考えられている。

3 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

超高エネルギーガンマ線は地球大気原子核と相互作用し電子対生成を起こしてしまうため、 地上での直接検出はできない。このとき生成される電子、陽電子は超高エネルギーガンマ線の エネルギーをそのまま引き継ぎ、地球大気を高エネルギーで伝播する。電子が地球大気の光速 よりも速く伝播した場合、チェレンコフ光と呼ばれる光を放射する。このチェレンコフ光は地 球に到来した超高エネルギーガンマ線の到来方向やエネルギーの情報を持っており、これを観 測し空気シャワーを再構成すればそれらの情報を引き出すことができる。この方法を大気チェ レンコフイメージング法という。

この章では、超高エネルギーガンマ線の地球大気での反応、チェレンコフ光の観測技術を紹介する。

3.1 大気中の超高エネルギーガンマ線の反応

3.1.1 空気シャワー

宇宙から飛来するガンマ線は地球大気の原子核と相互作用を起こし、地上まで降り注ぐこと はない。この相互作用の種類はエネルギー領域によって、光電効果、コンプトン散乱、電子対 生成があるが、今回紹介するエネルギー領域のガンマ線はそのほとんどが電子対生成を起こす ため、他2つの相互作用の詳しい説明は割愛する。地球大気に入射した高エネルギーガンマ線 は、地球大気原子核の作る電場に反応し電子と陽電子を生成する。この電子と陽電子もまた高 エネルギーを持ちながら地表へ降下してくる。また、電子・陽電子は荷電粒子のため大気中の 加速度運動から制動放射を起こし、ガンマ線を放射する。そのガンマ線も同様に高エネルギー を持ち、対生成電子・陽電子を作る。このように地球に飛来した1本のガンマ線は地球大気と 相互作用を起こし、複数の電子・陽電子とガンマ線になり、地表に落ちてくる。これを空気シャ ワーという。

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \tag{7}$$

$$e^-(e^+) \rightarrow e^-(e^+) + \gamma$$
 (8)

空気シャワーは高エネルギーガンマ線だけでなく宇宙線陽子・原子核も起こす。宇宙線の場合、ガンマ線と反応は変わりパイオンやミューオンを含めた複雑な反応をする空気シャワーとなる。宇宙線の空気シャワーとガンマ線の空気シャワーの比較図を図12に示す。

この2つの空気シャワーの大きな違いは2つある。1つ目の違いとして、電子の放射長は陽子 の衝突距離に比べて短く、宇宙線陽子より上空でシャワーがもっとも発達することがある。ガ ンマ線由来の空気シャワーの最大発達地点は地表から8-10 km 付近となる。2つ目の違いとし て、陽子由来の空気シャワーで生成される二次粒子は横方向の運動量を持ちシャワーが広がり やすいことがある。このシャワー発達の違いは後述する大気チェレンコフイメージング法を行 う上で非常に重要になってくる。



図 12: ガンマ線(左)と宇宙線陽子(右)による空気シャワーの比較。[16]

3.1.2 チェレンコフ光

光の速度 c は屈折率 n の物質中では c/n となり、真空中の光速度から値を落とす。物質中を 通過する荷電粒子が十分なエネルギーを持っていた場合、粒子の速度 v が c/n を上回る。この とき電磁波を放射し、これをチェレンコフ光と呼ぶ。

チェレンコフ光の放射条件は、チェレンコフ光の放射角度を θ としたとき、 $cos(\theta) = 1/(\beta n)$ で記述される(図13)。これを宇宙線電子に対応させると、n = 1.0003であるので、21 MeV以上のエネルギーを持っていれば、チェレンコフ光を放射できる。

荷電粒子が単位距離当りに放射するチェレンコフ光の量は以下の式で表される。

$$N = 2\pi\alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 1 - \frac{1}{(\beta n(\lambda))^2} \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

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を持つが、300 nm 以下の光は地球 大気に吸収され、地表に届くのはおよそ 300 - 600 nm の波長の光である。地表でのチェレンコ フ光観測では、この波長の光の検出が重要となってくる。



図 13: 粒子が物質中の光速を超えた際の反応のイメージ。 [15]

1 TeV のガンマ線が地球大気に到来した場合、空気シャワーの最大発達時には~1000 個程度 の電子・陽電子を生成される [11]。この粒子が放射するチェレンコフ光は、地表では 300 m 程 度の広がりを持ち、その光量は 300 - 600 nm の波長域で~50 photon/m² となる。

3.2 地上での超高エネルギーガンマ線観測

3.2.1 大気チェレンコフイメージング法

地表まで到達したチェレンコフ光は、この光を放射した荷電粒子の情報を持っている。この チェレンコフ光を強度や方向、形状を調べることで、地球に飛来した超高エネルギーガンマ線 の情報を得ることができる。しかし、大気で放たれるチェレンコフ光の99%が宇宙線陽子によ るものであり、超高エネルギーガンマ線由来のチェレンコフ光を観測するには宇宙線陽子由来 のもののようなバックグラウンドと識別しなければならない。そのために考えられた方法が大 気チェレンコフイメージング法である。

大気で放射されたチェレンコフ光は大面積の放物面鏡で集光し、複数の光検出器で観測する。 この時点では全ての光を観測するが、その光の分布は放射過程によって異なるものとなる。ガ ンマ線由来のチェレンコフ光と宇宙線由来のチェレンコフ光の違いはその広がりによるところ が大きい。前述の通り、ガンマ線由来のチェレンコフ光は宇宙線由来のものより広がりが小さ い。これを望遠鏡で観測すると、楕円状のような分布の信号が観測される(図 14)。これらを Hillas パラメータと呼ばれるパラメータ("width"、"length"、"alpha"、"distance")を使い、 信号の中からガンマ線由来のものを選定する(図 15)。

楕円短軸を width、楕円長軸を length と呼んでいる。ガンマ線由来の空気シャワーからの信 号は、シャワーの広がりの違いから宇宙線由来のものに比べ、width が小さくなる。信号の電 荷分布の重心からカメラ視野中心までの線と楕円長軸の角度を alpha と呼ぶ。観測天体から来 るガンマ線由来のチェレンコフ光の信号であれば、alpha は0 に近い値となる。宇宙線の場合、 様々な方向から到来するため alpha は大きな値となる。

以上のようなパラメータを使い、BGイベントの中から超高エネルギーガンマ線を検出する 方法が大気チェレンコフイメージング法である。この大気チェレンコフイメージング法を使い ガンマ線を観測する望遠鏡を。「解像型大気チェレンコフ望遠鏡」あるいは単に大気チェレンコ フ望遠鏡という。



図 14: 空気シャワーからのチェレンコフ光と望遠鏡に移るイメージ。 [16]



図 15: 大気チェレンコフイメージング法で用いるパラメータ。 [17]

3.2.2 ステレオ観測法

大気チェレンコフ望遠鏡を複数台並べて、観測する手法を「ステレオ観測」という。この方 法を用いることで、1台では原理的に求めることのできなかった宇宙ガンマ線の到来方向を精 度良く決定することができる。 方法として、それぞれの望遠鏡が得たシャワーイメージの楕円と楕円長軸を決定する。望遠 鏡の視野内にそれぞれの望遠鏡から得た楕円長軸を書き、その交点を決める。この点がシャワー の到来角となる。また、それぞれの望遠鏡が観測したシャワーイメージの楕円長軸から延長さ せた線の交点がシャワーの到来地点となる(図16)。この到来角と到来地点から、ガンマ線の 到来方向を一意に決定することができる。



図 16: 複数の望遠鏡で見たガンマ線シャワーイメージ。それぞれの楕円長軸の交点がガンマ線 の到来方向と推定される [11]

4 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

4.1 CTA 計画の概要

CTA 計画は MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS などの大気チェレンコフ望遠鏡の次世代の計画 として考えられている計画である。4 種類の望遠鏡を合計数十台設置し、現行のチェレンコフ 望遠鏡より一桁高い感度と、20 GeV から 100 TeV 以上までの幅広いエネルギー帯域を観測す ることを目指す。

4.1.1 目標性能

(a) 感度

CTA では、観測するエネルギー帯域の全てにおいて現行の大気チェレンコフ望遠鏡の10倍の 感度を目指す。エネルギー領域0.3-3 TeV では、50時間の観測で1 mCrab(10⁻¹⁴erg cm⁻²s⁻¹) の感度を達成し、かに星雲程度の明るさを持つ天体であれば30 kpc まで観測可能となる。図17 にモンテカルロシミュレーション(MC)を用いた CTA の感度曲線を示す。



図 17: シミュレーションによる CTA の感度と現行望遠鏡の感度の比較。 [4]

(b) エネルギー帯域

CTA では数十GeV から数百TeV までの4桁にも及ぶエネルギー帯域を観測する。このエネ ルギー帯域を一定の費用に抑えて観測するために、CTA では後述する3種類の望遠鏡を用い る。それぞれの望遠鏡が得意とするエネルギー領域を図19に示す。

低エネルギー側はチェレンコフ光の光量が少ないため、わずかな光を集光できるように大口 径の望遠鏡を用いる。高エネルギー側はチェレンコフ光の光量は十分だが、ガンマ線のエネル ギーが高くなるほどガンマ線量は少なくなる。そこで小口径の望遠鏡を広範囲に設置し、ガン マ線の統計量の向上を目指している。

(c) エネルギー分解能

エネルギー分解能はシャワー再構築の精度で決まる。(b) で述べた通り、観測するエネルギー 帯域によって主として観測する望遠鏡の種類が異なる。そのためエネルギー帯域によって分解



図 18: CTA が観測するエネルギー帯域と3種類の望遠鏡がカバーする領域。[4]

能は異なる値となる。代表的なエネルギー値の分解能として、50 GeV で 25%以下、1TeV 以上 で 10%以下という値になる。特に1 TeV 以上のエネルギー帯域に対しては、現行の大気チェレ ンコフ望遠鏡の 2 倍の性能になる。

(d)角度分解能

現行の望遠鏡では1 TeV で 6 arcmin の角度分解能を持っているが、これは他波長の望遠鏡に 比べて劣る値となる。CTA では望遠鏡台数を増やすことにより、1 TeV で 2 arcmin の角度分 解能を実現させる。



図 19: CTA の角度分解能シミュレーションと現行望遠鏡の角度分解能。赤実線は10 台以上での観測、赤点線は2 台での観測結果。 [4]

(e)時間分解能

CTA では 10 秒程度の時間分解能でガンマ線を観測する。これは MAGIC 望遠鏡や HESS 望遠鏡の 2-3 分の分解能に比べ1 桁小さい値となる。

4.1.2 観測サイト

CTA は北半球と南半球の2サイトに設置され、全天球を見渡せるように建設される。建設候補地を図20に記す。

北半球サイトは、現在 MAGIC 望遠鏡が設置されているカナリー諸島のテネリフェ、アメリ カのアリゾナ、メキシコのサン・ペドロ・マルティエが候補地である。南半球サイトは、ナミ ビアのアール、チリのアマゾネスが候補地である。

これらのサイトは現在議論が進められており、2015年に最終決定がなされる予定である。



図 20: CTA サイトの候補地。北半球と南半球に1カ所ずつ設置される。[12]

4.1.3 望遠鏡

幅広いエネルギー帯域を観測するため、CTA 計画では3種類の望遠鏡を設置する。3つの 望遠鏡はそれぞれ、大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope; LST)、中口径望遠鏡(Mid-Sized Telescope; LST)、小口径望遠鏡(Small-Sized Telescope; SST)と呼ばれており、別々の研究 機関で研究・開発が進められている。日本グループは宇宙線研究所を中心とした複数の大学で LSTの開発を、名古屋大学でSSTの開発を進めている。LST は南北それぞれのサイトに4台ず つ設置され、主に低エネルギー側の観測を担う。図21 は CTA の全体の完成予想図である。



図 21: CTA 完成予定図。 [24]

望遠鏡は全てで数十台設置されるが、北半球サイトと南半球サイトで設置される台数は異なる(図 22)。北半球サイトはLSTとMSTのみ設置される。これは北半球サイトが銀河系外を 主に観測するためである。銀河系外のガンマ線の内、数 TeV 以上のエネルギーを持つものは銀 河系外背景光などと対消滅してしまい、その数を減らしてしまう。そのため高エネルギー側を 主に観測する SST は設置されない予定である。逆に南半球サイトはLST、MST、SST 含め百 台近い台数が設置される。南半球サイトは銀河中心側を向いており、広帯域でのガンマ線源が 期待されている。



図 22: CTA の南半球サイト(左)、北半球サイト(右)の望遠鏡配置図。[12]

4.2 Large-Sized Telescope について

CTA では3種類の望遠鏡を併用するが、私たちのグループでは主にLST の開発を行っている(図23)。LST は CTA が観測するエネルギー領域の内、低エネルギー側となる、20 GeV から1000 GeV の観測を行う。光量が少なくなる低エネルギー側のガンマ線が放射するチェレンコフ光を検出するために、鏡の総面積は400平方m以上必要である。LST では望遠鏡を198枚の六角形球面鏡(図27;分割鏡)を用いる。この分割鏡を放物面鏡に設置することで、口径23mの放物面鏡を作る。LST の要求性能を表1に示す。

		- L J
Telescope parameter	Vaues	Comments
Layout	Parabolic	Intermediate solution between
		Parabolic and DC
Diameter of Dish	23 m	Consists of 198 segmented mirrors
Focal Length	28.0 m	
Pixel size of camera	$50.0 \mathrm{mm}$	Corresponding 0.1 degrees
Total reflectance	>85% btw. 300-600 nm	
PSF	D80 = 1/3 pixel(17 mm)	Diameter contains 80 % of light

表 1: LST の要求性能。 [14]



図 23: CTA LST の完成予定図。

4.2.1 焦点面カメラ

23 m 口径の望遠鏡主鏡は 28 m の位置に焦点面を持っており、そこに光検出器を設置する。 光検出器には浜松ホトニクス製の光電子増倍管(photomultiplier; PMT)が用いられる。CTA LST では焦点面に 1855 本の PMT を設置し、チェレンコフ光を検出する。

現在、PMT のキャリブレーションが行われており、設置の準備が進められている。

4.2.2 ライトガイド

焦点面カメラの前には「ライトガイド」と呼ばれる光学素子が設置される。これは主鏡から 反射された光をPMTにガイドする役割を果たしている。ライトガイドは片面が六角形、もう 片面が円形となっており(図24)、PMTの死角を埋める役割も果たす。また、ある一定以上の 入射角度を持つ光がライトガイドに入った場合、その通過効率を急激に下げることができ、主 鏡外のBG除去の役割も果たす。

4.2.3 構造体

CTA LST では、望遠鏡を 20 秒以内にあらゆる方向に向けることを目標としている。よって 望遠鏡構造体もできる限り軽くする必要がある。そのため CTA LST は CFRP()を多用し、 軽量化を目指した。また、それに加え剛性を高めるように構造体のデザインが作られた。結果 として望遠鏡総重量は~100トンとなり、同様の構造体を鉄で作った場合に比べ 23%の重量に 抑えることができる予定である。

4.2.4 ミラー

望遠鏡主鏡には、198枚の六角形球面鏡(図27;分割鏡)が用いられる(図26)。この分割 鏡は対辺長1.51m、重さ50kg、中身はアルミハニカム構造になっており、衝撃に対する耐性 の強化と軽量化がなされている。分割鏡は3点で支えられ、そのうち2点がアクチュエータと なっており、分割鏡の方向を変えられるようになっている。図28は、分割鏡を支える3つの軸



図 24: CTA LST に用いるライトガイド。 [12]



図 25: LST の構造体。 [4]

の位置である。1100 mmΦの円周上に位置しており、無風状態かつ天頂角0度の場合は1本当たり130 Nの負荷がかかる。

 \mathbf{S}



図 26: CTA LST の分割鏡配置。 [12]

カメラ取り 付け位置



図 27: CTA LST に使われる分割鏡。



図 28: 分割鏡を支える軸の位置。 [14]

表 2: LST 用分割鏡の要求性能。 [14]

Segmented mirror pa-	Values	Comments
rameter		
Shape	1.51 m flat to flat hex	Pith of space frame knots is 1.54 m
Area	1.98 m^2	
Weight	$\sim 46 \text{ kg}$	Corresponding to 20 kg/m^2
Surface Shape	Spherical	
Thickness	< 80 mm	
Focal length	28.0 - 28.4 m	Optimized with ray trace
Reflectance	>85% btw. 300-600nm	
PSF	D80 = 1/4 pixel(13 mm)	Diameter contains 80 % of light
Survival temp.	−25 - +60 °C	
Operational temp.	−10 - +30 °C	
Rear surface	Flat preferred	
Flanges(interface to	Three flanges at 600 mm from the	
actuators)	center	
Life time	> 10 years	Annual degr adation of the re-
		flectance should be

5 Active Mirror Control (AMC)の開発

チェレンコフ望遠鏡は数十枚から数百枚の分割鏡を放物面に設置して、望遠鏡の主鏡を作る。 このとき使用している鏡が分割鏡であることから、主鏡を放物面に保つにはこの分割鏡1枚1 枚を操作しなくてはならない。これは各望遠鏡サイトによってやり方は異なるが、多くの場合 では観測前に放物面に合わせそれ以降は人為的には動かさない、という方法を用いている。し かし、CTA LST では望遠鏡を高速回転させることやそのために望遠鏡構造体を軽量化するこ とを行うため、この方法では観測中に望遠鏡光学系が要求値以上に歪んでしまう恐れがある。 そこで考案されているのが、Active Mirror Control (AMC) システムである。この方法は観測 と並行して、分割鏡を理想の状態に補正し、常に望遠鏡主鏡が放物面を成すようにする方法で ある。

本項では、AMC システムを用いる具体的な理由、CTA 以前に AMC システムを導入した MAGIC 望遠鏡での AMC システムについて、そして CTA LST で運用される予定の AMC シス テムについて述べる。

5.1 AMC で想定される問題

AMCで想定される歪みとして、望遠鏡構造体の自重、高速回転に起因するものが考えられる。 望遠鏡構造体は、観測対象のあるあらゆる方向に対し、20秒以内に向くことを目標としてい る。この高速回転を実現させるために、LSTの構造体には CFRP を用いる。そのときの構造 体の総重量は約 100 トンとなる。これは鉄で同様の構造体を作った場合の 23%の重さであり、 CTA LST の目標とする高速回転も可能であると考えられている。しかし、軽量化に伴い、構 造体自身の強度の不足が考えられる。図はシミュレーションを用いて計算された構造体が天頂 角を向いていた場合(図 29)と、90度を向いていた場合(図 30)の歪み量である。この図か ら、天頂角が0度のときに最大 11 ミリメートル、90度のときに最大 13 ミリメートルの歪みが 発生する。このような歪みは観測中での天頂角方向の変化に効いてくる。

また、CTA LST は半回転を 20 秒以内で行う。この速度で動かした際、望遠鏡構造体に歪み が生じ分割鏡にも影響を及ぼしてしまう。その回転速度や方向は状況に応じて変わるが、分割 鏡の方向のずれはおおむね十数 arcsec 程度であると予想されている。それらは一様ではなく、 回転速度や方向によって個々の分割鏡特有の歪みとなって現れる。

風圧などによる分割鏡の方向のずれも考えられる。望遠鏡の方向と風向きによっては風圧を 面として受けてしまう場合もあり、そう言った場合に分割鏡も大きな影響を受けてしまう。望 遠鏡の天頂角別の分割鏡に対する風圧の影響を図 31 に示す。

この他に温度による影響もある。観測サイトによっては+40度から-20度まで変わる地域も あり、望遠鏡構造体の熱膨張による影響を受けてしまうと考えられている。ただし、温度によ る影響は突発的ではなく上記の影響ほど強く効かないと思われる。

以上のような理由から分割鏡単位での補正は、望遠鏡感度を保つうえで重要なプロセスと なる。

5.2 CTA LST における AMC システムの概要

CTA LST は MAGIC 望遠鏡をベースにデザインされている。AMC システムも同様に MAGIC 望遠鏡で使われている方法を元に開発している。



図 29: 天頂角0度時の望遠鏡構造体にもたらされる自重の変形量。[14]



図 30: 天頂角 90 度時の望遠鏡構造体にもたらされる自重の変形量。 [14]



図 31: 風圧により鏡にかかる力のシミュレーション効果。 [13]

以下に CTA LST で用いられる AMC システムの補正方法を記す。



図 32: CTA LST のイメージ。

(1)

左図は CTA LST のイメージ画像であ る。LST の主鏡中心から赤外線のレー ザーを照射し、PMT カメラの横側にあ る標的に当てる。この赤外線レーザー は望遠鏡主鏡の光軸の役割も担ってお り、これを基準に 198 枚の分割鏡を放 物面にセットする。


[14]



(2)

左図はPMT カメラ側のイメージ画像 である。PTMカメラの両端にある標的 に向かってレーザーを照射する。PMT の周りに取り付けられている LSD 光 は、PMT カメラの位置を知るための ものである。望遠鏡主鏡から照射され るレーザーのスポットと PMT カメラ 側に取り付けられた LED 光の対応関 図 33: PMT カメラ側のイメージ画像。係を見ることで、PMT カメラが本来 あるべき位置からどの程度動いている かがわかる。ただ、本研究ではここま での開発は行っていないので、詳しい 説明は割愛する。

(3)

図 34 は分割鏡とそれに取り付けた CMOS カメラである。主鏡に用い る 198 枚の分割鏡全てに、このよう に CMOS カメラが取り付けられる。 CMOS カメラは1280×960 ピクセルの 画角、レンズは焦点距離 35 mm のも のを使う(§6で述べる)。これで焦 点面カメラ部分を取ると、3840×2880

図 34: 分割鏡に取り付けた CMOS カ mm の大きさの画像になる。 メラ。



図 35: CMOS カメラが撮るレーザ スポット。左:分割鏡が正しい方向を向 いているとき、右:誤った方向を向いて いるとき。

(4)

図 35 は分割鏡に取り付けた CMOS カ メラが撮る画像の簡単なイメージであ る。分割鏡が正しい方向を向いていれ ば、画角内のレーザースポットは特定 の位置に見える。この点を"fix point" と呼ぶことにする。分割鏡が誤った方 向を向いていた場合、レーザースポッ トは fix point とは異なる位置に見え る。この fix point と画角内のレーザー スポットの位置関係から、分割鏡がど の方向を見ているのか、どのようにア クチュエータを動かせば分割鏡が正し い方向を向くのかがわかる。その量を 求めたら、アクチュエータを使い分割 鏡を補正する。

現行の大気チェレンコフ望遠鏡については、MAGIC 望遠鏡で類似した方法がとられている が、一つ大きく異なる点がある。それはMAGIC 望遠鏡では分割鏡にレーザーを、主鏡中心に CCD カメラを取り付けていることである。こちらの方法ではレーザーを一本ずつ照射する必要 があり、分割鏡全ての補正に"分割鏡1枚の補正時間×全体の分割鏡の枚数"だけ時間がかかっ てしまう。この方法にかかる補正時間は、CTA LST の高速回転に要する時間に比べて一桁大 きくなってしまい、十分な補正は難しい。

CTA LST で用いる AMC システムはその部分を克服し、望遠鏡の回転速度に比べてほとんど 変わらない時間で分割鏡を補正する。まず、分割鏡に CMOS カメラを取り付けたことで、レー ザースポットを個々の CMOS カメラで読み取る。レーザースポットは CMOS カメラによって 変わるものではないので、別々の CMOS カメラで同時撮影ができれば、複数の分割鏡を同時に 補正できる。また、198 枚の分割鏡を 13 枚のクラスターに分割し、それぞれのシステムを1 枚 のボード PC で制御する。クラスターに分けることで補正に要する時間を"分割鏡1 枚の補正時 間 × クラスターの分割鏡の枚数"に減らすことができる。このようにして、補正時間をできる 限り短くし、CTA LST の性能を常に一定に保つようにする。

5.3 AMCの要求精度

LST 全体の性能は前述の通りであるが、そのうち AMC システムに関わる部分は、LST 分割 鏡方向の精度と補正に要する時間である。

まず分割鏡方向については、CTAでは分割鏡1枚に対して、望遠鏡ピクセルの3分の1の精度での観測を目指している。そこで分割鏡のPSF(point spread function)を14 arcsecの範囲に収めることを要求性能としている。分割鏡の方向のずれをこの14 arcsec 以内にすることがAMCの主目的であり、これが要求値となる。

AMC システムでは、この要求値を基準に画像解析の精度を考える。この数字を 28 m 先で表 すと、1.67 mm の長さになる。§6-1 に詳しく述べるが、本研究で使用する CMOS カメラの性 能、レンズの種類から、28 m 先の CMOS カメラの画角は1 ピクセル=3 mm となる。よって、 本研究ではレーザースポットの位置を 0.5 ピクセル以内の精度で決定しなければならない。

AMC の要求性能と AMC システムに用いる装置の性能の対応表を図 36 に示す。CMOS カメ ラの性能については、ピクセルサイズと 28 m 先でのピクセルサイズに対応する長さを書いた。 CMOS カメラとアクチュエータの性能については §6 で詳しく述べる。

また、AMCシステムの開発では補正時間も重要となってくる。CTA LST の要求性能は180deg/20sec である。この回転を行うときは、初期状態の分割鏡方向を記した Lookup Table を見て、分割 鏡方向を補正する。Lookup table で補正しきれなかった量を AMC システムで補正する。その ため、AMC システムの補正時間はできる限り早い方が良い。本研究では目安として、1枚の 分割鏡方向の補正当り1秒未満を目標値とした。

5.4 宇宙線研究所にある分割鏡

本研究の目的は上記のAMCシステムを構築し試験を行うことである。そのために試験を模 擬的に行うための装置が必要である。宇宙線研究所では、分割鏡を固定軸と2個のアクチュエー タの3点で支える架台を制作し設置した(図37、図38)。

	pixel	mm				step	turn	
	(CMOS)	(CMOS)	degree	arcsec	miliradian	(actuator)	(actuator)	14 arcsec
pixel	1	3.00	0.00614	22.1	0.107	22.6	0.0885	1.58
mm	0.333	1	0.00205	7.37	0.0357	7.54	0.0295	0.526
degree	163	489	1	3.60E+03	17.5	3.69E+03	14.4	257
arcsec	0.0452	0.136	0.000278	1	0.00485	1.02	0.00400	0.0714
miliradian	9.33	28.0	0.0573	206	1	211	0.826	14.7
step	0.0442	0.133	0.000271	0.977	0.00474	1	0.00391	0.0700
turn	11.3	33.9	0.0694	250	1.21	256	1	1.79
14 arcsec	0.633	1.90	0.00389	14.0	0.0679	14.3	0.560	1

図 36: CMOS カメラ (pixel、mm)、分割鏡方向 (degree、arcsec、miliradian)、アクチュエー タの移動量 (step、turn) と AMC の要求性能 (14arcsec) の対応表。



図 37: 試験用架台の表側。分割鏡を取り付けてある。

分割鏡を支えている3点は分割鏡の中心から直径1100 mmの円周上に位置しており、上側1 点の固定点、下側2点のアクチュエータが分割鏡を支えている(図39、図40)。また、分割鏡 下部には切り込みがあり、ここに CMOS カメラを設置する(図41)。

次章では、AMCシステムを開発するにあたって使用した装置とソフトウェアについて、詳しく述べる。



図 38: 試験用架台の裏側。分割鏡がアクチュエータを含む3点で支えられている。



図 39: 分割鏡を支えている固定軸。



図 40: 分割鏡を支えているアクチュータ。



図 41: 分割鏡切り込みに取り付けられた CMOS カメラ。

6 AMCに関するソフトウェア開発

§3-3でAMCシステムにつて述べたが、AMCシステムを開発するにあたって全体のプログラムを3つのパートに分けた。CMOSカメラから画像を取得する "capture part"、取得した画像を解析しレーザースポットの位置を同定する "analysis part"、求めたレーザースポットの位置から補正量を求めアクチュエータを動かす "actuator part"、である。

capture part では、Linux 上での CMOS カメラの認知及び操作のために、"aravis"というフ リーライブラリを使う [25]。aravis は GenICam と呼ばれるネットワークカメラの規格に基づい て作られた、glib/gobject ベースのライブラリである。本研究では、この aravis を使って、画 像取得プログラムを開発した。

analysis part は、1280x960 pixel の画像データの中からレーザースポットを見つけ、その位置 を同定する。本研究では、その同定方法にチェレンコフイメージングで用いられているスポッ ト解析手法を用いた。これは画像データにしきい値を与え、このしきい値を超えたデータのみ を計算し、重心位置やwidth, length などのパラメータを計算するものである。

actuator part では、上2つの part から得たレーザースポットの位置と本来あるべきレーザー スポットの位置の差から補正量を求め、アクチュエータを使い分割鏡を動かす。アクチュエー タを動かすプログラムについては、先行研究として、近畿大学の野里が開発を行い、2013年度 に修士論文としてまとめている [8]。本研究では、この先行研究をふまえ AMC システムに適応 できるようにプログラムを改良した。

6.1 CMOS カメラに関するプログラム

6.1.1 使用する CMOS カメラ

使用する CMOS カメラは、The Imaging Source 社の"DMK 23GM021"である(図 42)。"DMK 23GM021"は GigEVision というインターファイスに対応したネットワークカメラの1つで、仕様を表 3 に示す。



図 42: CMOS カメラ"DMK 23GM021"。

	[]
ビデオフォーマット@フレームレート	1280 x 960 @69 - 8 frame/sec
フォーマット (インチ)	1/3 "
解像度	H:1280 pixel, V:960 pixel
ピクセルサイズ	H:3.75 $\mu\mathrm{m},$ V:3.75 $\mu\mathrm{m}$
インターフェイス	GigE
供給電圧	48 VDC - 56 VDC (PoE)
消費電力	100 mA @48 VDC
寸法	H:29 mm, W:29 mm, L:57 mm
質量	65 g
gain	0 - 9 dB
温度(動作時)	-5 - 45 °C
温度 (保管時)	-20 - 60 °C
湿度(動作時)	20 - 80 % (結露しないこと)
湿度 (保管時)	20 - 95 % (結露しないこと)

表 3: CMOS カメラ"DMK 23GM021"の仕様。 [26]

CMOS とは、Complementary metal-oxide-semiconductor field-effect transistor(相補性金属 酸化膜半導体)の略称で、これ用いた映像素子をCMOS イメージセンサー(以下、単にCMOS と書く)という。CMOS に光が照射されると CMOS を経て電気信号に変換され、これが画像 データとなる。使用する CMOS カメラはこの画像データをイーサネットケーブルを経由して PC に送る。ピクセルの分解能は 1Byte、つまり 0~255 の範囲で光の強弱を現す。また、この CMOS カメラは赤から近赤外に良い感度を持っており、本研究で使用する赤外線レーザーとの 相性は良い(図 43)。



図 43: CMOS カメラ"DMK 23GM021"の分光感度特性。 [26]

DMK 23GM021 の電力供給には Power over Ethernet (PoE) を用いる。PoE はイーサネットの役割を保持したままデバイスに電力を供給できる技術のことである。本研究ではこの PoE のハブを使い、CMOS カメラへの電力供給と画像データ取得を行った。PoE の詳しい仕様については § 6-4 に記す。

使用したレンズは「SV-3518V」(図 44) であり、仕様を表 4 に記す。レンズを使用する上で 最も重要なのは焦点距離であり、この値から CMOS カメラの画角内の距離が決まる。本研究で 使用したレンズは焦点距離 35 mmのもので、CMOS カメラの画角内の距離は 3840×2880 mm となり、1pixel 当り 3×3 mm となる。



図 44: CMOS カメラのレンズ "SV-3518V"。

表 4: 使用するレンズの仕様。 [27]

形式	焦点	絞り	画 角	最近接	フィルタ	質量	鏡筒長	適合最大
	距離	(F 値)	$(V \times H)$	距離	サイズ	(g)	(mm)	撮像素子
	(mm)			(mm)				
形 3Z4S-LE SV-3518V	35	1.8~	$10.8 \times$	300	M27.0	47	33.5~	1/3 イン
		Close	14.4		P0.5		37.5	チ

6.1.2 aravis ~linux 用ライブラリ~

CMOS カメラの Linux 上での操作のために、"aravis"というフリーライブラリを使った。上 述の通り、aravis は GenICam というネットワークカメラの規格に基づいて作られたライブラ リである。GenICam というのは、GigEVision を含む様々な物理的インターフェイスのネット ワークカメラを共通の API でコントロールするための規格である。aravis は GenICam を Linux で扱えるようにしたもので、glib/gobject をベースに作られている。

capture part においてもっとも重要なことの一つとして、CMOS カメラが画像を正常に取得 できたかどうか確かめることがある。aravis では、画像取得の際にその画像の状態値を共に返 す。この状態値を見ることで画像取得が正常かどうかを判断する。

6.1.3 画像取得プログラム

以上を踏まえて、本研究では画像取得プログラムを開発した。プログラムのフローチャート を図 45 に示す。



図 45: capture part のフローチャート。

「カメラの接続、初期化」でCMOS カメラを認識し接続する。このプログラムの最初のみの 動作で、分割鏡を補正するというループの中には入らない。そのため、フローチャートの始ま りは2つに分かれているが、基本的に左側が通常運用時である。「パラメータの設定」はCMOS カメラの基本性能である exposure や frame rate の設定を行う。この動作も基本的に最初のみの 動作であるが、1つ前のループでのレーザースポット解析時の結果では exposure を変更する。 具体的には、レーザースポットのピクセル値がサチュレーションを起こしていたら現在の値か ら-100(µs)、レーザースポットの最大値が 100 を下回っていたら+100(µs) するようになってい る。こうすることで、常に良質なレーザースポットを含む画像を取得できるようにする。「画像 取得」では上記で設定したパラメータで画像を取得する。その後には、画像を正常に取得でき たかを調べる動作があり、これをクリアしたら次の analysis part に進む。正常に画像を取得で きなかった場合再度画像取得を行うが、10 回取り直しても正常に取得できなかったら、その回 の画像取得はあきらめて次の分割鏡に進む。画像を取得できない主な要因として、画像データ 取得の time out やデータ送信でのエラーがある。この場合のエラー処理は現在開発中である。 このような動作をするプログラムを、本研究では開発した。

6.2 レーザースポット解析

6.2.1 想定される BG

CMOS カメラで取得した画像は 1228800 個の pixel を持っている。この画像データからでき るだけ早くレーザースポットを決定しなければならない。レーザースポット同定の際に考慮し なければならないのがバックグラウンド (BG) である。ここでは BG を 2 種類に分けて、それ ぞれの対策を考えた。

1つ目にホットピクセルと呼ばれる BG である。これは本来暗いはずの領域に一点だけ明る い点があるような場合である(図46)。通常このような点は、機能しなくなったピクセルが画 像取得時に常にサチュレーションを起こして画像データとして読み込まれる、というものだが、 本研究の測定時にサチュレーションを起こさず、しかし周囲の点に比べて極端に明るい点を発 見した。そのためサチュレーションを起こしていない場合でも、BG 処理として考慮しなくて はならない。そこで本研究では、各々の点と周囲の点の比を見て、ホットピクセルかどうかを 見極める方法を用いた。調べたい点の値をその点の上下左右4点の平均値で比を取る。このと きホットピクセルでなければ、つまり一様に暗い領域もしくはレーザースポットのような明る い領域であれば、比の値は1に近い値になる。しかしホットピクセルであれば、この比が十分 大きくなり、そうでない点と区別がつけられる。

2つ目に月光や人工光などあらゆる光の反射光である。これらの光が PMT カメラの金属フレームに反射し、CMOS カメラに撮られることがある。この例は上記のホットピクセルと違い、大きな明領域を持つ BG となる。この場合、上記の比を用いた BG 処理は使えず、別の方法を取らなければならない。レーザースポットとこの BG との比較として、2つの方法を考えたが、それは次節で紹介する。



図 46: 通常の暗い領域と hot pixel を持つ暗い領域の比較のイメージ。

6.2.2 レーザースポット同定方法

レーザースポット同定の方法として、大気チェレンコフイメージング法に用いられる計算手法 を使った。この方法は最初にチェレンコフイメージングを用いて宇宙ガンマ線を観測した Weekes の論文に用いられている方法である [5]。ある領域でのピクセルに対ししきい値を設け、x 軸、 y 軸のそれぞれの重み付き平均を求める。この計算する領域の決め方は複数あるが、ここでは もっとも簡単なピクセルの最大値の周辺という条件を用いている。この計算から得られるパラ メータは「重み付き重心」「width」「length」「スポットの傾き」である。また計算過程におい てスポットのサイズやピクセルの最大値もわかる。このうち、重み付き重心をレーザースポッ トの「位置」として考えた。これらのパラメータを比較することで、レーザースポットとかど うかを決定する。

次に重要になってくるのは、解析に要する時間である。上記の解析方法は画像データ全てを読 み取ることを前提としている。画像データにはレーザースポットの他に月光などのBGやPMT カメラ周囲のLED光が含まれる。それらがレーザースポットよりも明るかった場合、そちらの 周辺について計算しパラメータを求めてしまう。レーザースポットである条件にはかからない と思われるが、その計算にかける時間は余計なものである。できる限り解析に要する時間を短 くするために、次節のような方法を考案した。

6.2.3 用いる解析手法

上記より、本研究では大気チェレンコフイメージング法に用いられている計算手法を使用す ることにした。しかし、1228800pixelのデータを全て解析すると時間を要する上、レーザース ポット以外の明るい領域も同時に計算しまい、誤認識の割合が増えてしまう。AMC システム の、ひいては本研究の、できる限り早くレーザースポットを同定する、という目的のために何 かしらの方法を用いて、これを改善する必要があった。そこで考案したのが、特定の点の周囲 のみを調べる方法である。以下この方法を spotspace 法という。図 47 は spotspace 法を模した フローチャートである。

この方法では 1280x960 の画像データ全てを読み取り解析するのではなく、ある領域に絞って 解析を行う。その領域の決め方として、fix point もしくは1つ前に捕らえたレーザースポット の位置を使う。調べる領域は最初の画像取得からの解析時は fix point の座標を、それ以降は前 回の解析時に得たレーザースポットの座標を中心に領域を決める(図 48)。本研究では中心点 の座標± 60pixel の領域としているが、これはのちに詳しく調べ、必要なら変更しなければな らない数字である。まず最初に、この領域から pixel 値の最大値点を見つける。このときホット ピクセルは § 7-1 に記した方法で除外する。最大値点を検出したら、その点の座標± 30pixel の 範囲でパラメータ計算を行う。このパラメータ計算は § 7-2 の方法で計算されるものである。こ こで計算に用いるピクセルのしきい値には、最大ピクセル値の 10 分の 1 という値を使う。これ らのパラメータの内、width、length、size、maximum value を用いて、レーザースポットを決 定する。これらを用いる理由は § 7-2 に、CMOS カメラの性能評価の測定と共に記載する。

もし、1回目の計算で得られた値がレーザースポットにふさわしい値でなければ、それはレー ザースポットでないと判断し次の段階に行く。上記の最初のステップである、ピクセルの最大値 点を見つける動作において、その範囲を広げて捜索する。広げる範囲として本研究では30pixel としたが、これもまた詳しく調べなければならない値である。これ以降は上記の通りに、最大



図 47: analysis part のフローチャート。



図 48: ピクセルの最大値の探す範囲。

値点の座標±30pixelでパラメータ計算を行い、レーザースポットかどうかを判断する。もしこ れでも見つからなかった場合、さらに範囲を広げて捜索する。最終的に画像データ全体を読み 取り、それでも見つからなかった場合、この画像からのレーザースポット同定はあきらめ、次 のCMOSカメラに進む。見つからなかった場合は、次の画像取得時から何かしらの対策をとる 必要があるが、本論文中では開発途中である。

6.3 アクチュエータ操作用プログラム開発

6.3.1 LST アクチュエータ

CTA LST で使われるアクチュエータは、Zurich 大学で制作された回転トルク式のステッピ ングモーターを用いる。このステッピンモーターが回転することでアクチュエータが上下方向 に動き、分割鏡の方向を変えることができる。1枚の分割鏡は3点の軸で支えられ、1点が固定 軸、2点がアクチュエータ軸となる。また、アクチュエータにはコの字型のジンバルを噛ませ てあり、アクチュエータはその部分を中心に回転することができるようになっている。2つのア クチュエータはそれぞれ1軸方向のみに回転できるものと2軸方向に回転できるものがある。2 軸方向に回転できるものは、2軸を組み合わせてあらゆる方向に回転できるようになっている。 ここでは、1軸方向に回転できるアクチュエータは1軸フリーのアクチュエータ、2軸方向に回 転できるアクチュエータを2軸フリーのアクチュエータと呼び、以降はそのように書く。この 1軸フリーのアクチュエータと2軸フリーのアクチュエータを使うことにより、アクチュエー タの伸縮に伴う分割鏡のアクチュエータ設置部分の負担を軽減することができる。図 6.3.1 に アクチュエータの実物を示す。



図 49: アクチュエータ図。 [8]

現在開発されているアクチュエータは MST 用に作られたものと LST 用に作られたものの 2 種類がある。それぞれ MST アクチュエータと LST アクチュエータと呼びことにする。どち らもステッピングモーターの1回転(1 turn)当り1 mmの伸縮をするが、1 turn 当りに刻むこ とのできる step 数に違いがある。MST アクチュエータは1 turn = 32 step だが、LST アクチュ エータは1 turn = 256 step である。その他にも違いはあるが、詳しい比較は割愛する。LST ア クチュエータの性能のみ、表5に記載する。なお、ここで MST アクチュエータの説明を入れた 理由として、本研究を始めた時点で LST アクチュエータは開発途中で完成しておらず、MST アクチュエータを用いる他なかったことがある。先行研究では MST アクチュエータを用いた 開発を行い、本研究の途中段階で LST アクチュエータが完成し Zurich 大学から宇宙線研究所 に届いたのでそちらを使い開発、実験を行った。本研究の測定では、LST アクチュエータを用 いた。

アクチュエータの操作には Digi International 社の XBee という無線モジュールを使っている。 XBee はシリアル通信を行うための無線モジュールであり、これをアクチュエータ側とアクチュ エータに指示を送る PC 側に接続する(図 50、図 51)。この XBee は、Digi International 社か ら Windows 用と MAC 用に操作用アプリケーションが提供されているが、LST の運用は Linux で行われるためそのプログラムを自分たちで作らなければならなかった。野里らはその開発に 取り組み、XBee を用いたアクチュエータの制御に成功している。

表	5:	LST	P	ク	チ	ュエー	タ	の性能。	[13]	

	値	コメント	
Range of drive	36 mm		
Step size	$5 \ \mu m$	1/200th of one turn	
Positional accuracy	$< 5 \ \mu m$		
Mechanical clearance	$\pm 10 \ \mu \ m$		
Elevation speed	0.5 mm/s	more speed $=$ less force	
Position encoding	Absolute	no init needed after power cut	
Moving force	> 700 N	safety factor 2.9 @ 70 km/h $$	
Survival force	> 9000 N	safety factor 5.6 @ 200 km/h $$	
Holding force	Self-locking when unpow-	no power needed when parking	
	ered		
Actuator weight	$\sim 1.6 \text{ kg}$	without gimbals	
Operational voltage	18 - 24 V	internal overvoltage protection	
Standby current	< 50 mA		
Driving current	850 mA	internal auto-resrt fuse	
Communication	Wireless		
Housing	sealed	IP67, UV-resistant	
Actuator controller	Flash-mamory microcon-	firmware upgradeable in-situ via	
	troller	wireless connection	

6.3.2 先行研究

アクチュエータに関する開発は、近畿大学の野里らによって進められていた。ここでは先行 研究のうち、本研究に関わる部分のみ、説明する。

本研究に深く関わる部分として、以下のことがある。

(1) XBee に関すること

- (2) APIモードに関すること
- (3) Linux 用プログラムに関すること

以上の3つについて、本節では述べる。

(1) XBee について

XBee とは Digi International 社で開発されたシリアル通信用の無線モジュールである。この XBee を PC 側とアクチュエータ側の双方に取り付け、アクチュエータの動作指示や現在位置の 確認を行う。このとき、アクチュエータ側の XBee の設定やアクチュエータ操作のためのコマン ドは Zurich 大学によって開発されたものを使う。表6にアクチュエータ操作用コマンドを記す。

XBee の設定には、Digi International 社が提供している X-CTU(図 52) というアプリケー ションを使う。X-CTUには XBee の XBee パラメータの設定変更や XBee 間の通信などができ、 本研究での XBee の初動テストはこの X-CTU を使った。

アクチュエータ側の XBee については基本的な設定が完了しているが、PC 側の XBee については新たに設定を加えなければならない。XBee が有しているパラメータのデフォルト値から



図 50: PC 側の XBee。



図 51: アクチュエータ側の XBee。

の変更点を表7にまとめる。

(2) APIモードついて

XBeeにはAT(透過)モードとAPIモードの2つのモードがある。簡潔に書けば、ATモードは1対1で相手を指定した後通信をし、APIモードはAPIフレームという文字列を送信し、文字列に書かれたアドレス情報にあるXBeeと通信をする。本研究では1個のXBeeで複数のアクチュエータと通信をするため、事前に相手を指定する必要のないAPIモードで通信を行う。

APIモードでの通信には、APIフレームという文字列を組む必要がある。図 53 に APIフレームの1 例を書く。この APIフレームの中に、相手側のアドレス情報や送りたいコマンドを入力する。

図 53 の「Actuator 64bit address」部分に指示を送りたいアクチュエータの MAC アドレス を、RF データ部分に上記の Zurich コマンドを ASCII コードから 16 進数表記に直して入力す る。API フレームの最後にある「Checksum」の計算方法は「0xFF - (Frame type から RF デー タの和)」となる。

野里らの研究では、この API フレームを使いアクチュエータに指示を送るところまで成功

it xotu			
	×· E @ ? ·) 🌣 🔝 🐇	
Radio Modules	Radio Configuration [- 0013A20040	B33962]	
Name: Function: XBEE PRO 802154 ★ Port: COM/3 / N/1 / N - API ★ Marc: COM/3 / N/1 / N - API ★	S 🖉 🕍	Parame	ter 🕂 🗭
	Firmware information Product family: XBP24 Function set: XBEE PRO 80216 Firmware version: 10ec	4 Written and Written and Writ	d default
	 Networking & Security Modify networking settings 		
	() CH Channel	12	۷ 🖉
	() ID PAN ID	3332	۷ 🖉
	() DH Destination Address High	13A200	۱ 🖉
	DL Destination Address Low	FFFF	۵ 🖉
	MY 16-bit Source Address	0	۵ 🖉
	() SH Serial Number High	13A200	٢
	SL Serial Number Low	40B33962	٢
	() MM MAC Mode	802.15.4 + MaxStream header w/ACK 💙	۷ 🖉
	(i) RR XBee Retries	0	۱ ۷
	() RN Random Delay Slots	0	۷ 🖉
			[™]

⊠ 52: X-CTU.

した。

(3) Linux 用プログラムについて

以上の2つはWindows用のアプリケーションで可能だが、CTA LST の運営に使われる OS は Linux である。そのため上記の、特に API モードによる通信を行うプログラムを新たに作る 必要があった。Linux上でアクチュエータを操作するプログラムは野里らによって作られており、すでに近畿大学で制御に成功している。

シリアル通信に使用したライブラリは "Libserial" というものを使用した。これはシリアル通 信全般に適応できるもので、野里らはこれを使い XBee 通信用ライブラリを完成させた。本研 究でも、このライブラリを用いて開発した。

以上のように、近畿大学でアクチュエータ操作の先行研究はすでに行われており、本研究に おけるアクチュエータ操作はそれを引き継ぐ形になっている。次節では、先行研究からの改良 点について述べる。

6.3.3 先行研究からの変更点

先行研究では、Linux上でAPIモードを用いたアクチュエータの操作に成功した。本研究で はこのプログラムを改良と、いくつかの改善を行った。

まず、LST アクチュエータに取り付けてある XBee のパラメータの一つである RO 値の変更 を行った。RO 値は API フレームに RF データを書き込む時間に関するパラメータで、これが 短すぎると RF データが 2 つに分かれ送られてしまう。マニュアルによると RO 値 1 unit 当り 1 character であるようなので、位置の読み取りで返ってくるデータ数の RO=30 と設定した。



図 53: API フレームの仕様。 [8]

また、XBeeの通信仕様には4つの特殊文字が含まれており、APIフレームにそれらの文字が あった場合、エスケープシーケンスを用いなければならない。先行研究ではエスケープシーケ ンスを含まずとも問題は起きなかったが、ICRR での測定時に特殊文字の影響で誤作動を起こ す問題があった。本研究ではAPIフレームに特殊文字が含まれていた場合、エスケープシーケ ンスを加え誤作動を起きないようにプログラムを改良した。

6.3.4 補正量計算

レーザースポットの位置を決定することで、現在の分割鏡の方向と目標とする方向からどの 程度異なっているかがわかる。ここではレーザースポットの位置からアクチュエータの移動量 を求める方法を述べる。



図 54: 分割鏡を横から見たとき、アクチュエータが a 動いたときの CMOS カメラの視線方向 の変化。

ここで図 54 は分割鏡に取り付けられたアクチュエータが a 伸びたときの分割鏡の方向は a/d だけ変化する。分割鏡に取り付けた CMOS カメラの視野も同様に a/d だけ変化し、画角内の レーザースポット位置は $x = 28000 \times a/d$ だけ動くことになる。

本研究で使用した分割鏡を支える固定点とアクチュエータ点は、分割鏡の中心から直径 1100 mmの円の内接三角形の頂点に設置されている。ここで片方のアクチュエータが伸縮したとき、分割鏡は他の2点の結ぶ直線を軸に回転することになる。この軸とアクチュエータ点の距離 d は、d=825 mm となる。この距離が半径となり、分割鏡の方向が変わることになる。よって、分割鏡に取り付けられている CMOS カメラもこれに応じて動く。例えばアクチュエータが a=1 mm (=1 turn) 動いたとき、分割鏡の方向は a/d=1/825 mrad 変わる。その伸縮した分だけ CMOS カメラの画角内のレーザースポットは移動する。28000 mm 先のレーザースポットの移動距離 x は $x = 28000 \times (a/825)$ となる。

よってアクチュエータが伸縮した際の CMOS カメラの画角内のレーザースポットは、直線に 近い軌跡をとる。1軸フリーのアクチュエータ軸を動かしたときのレーザースポットの軌跡を1 軸のアクチュエータ軸、2軸フリーのアクチュエータ軸を動かしたときのレーザースポットの軌 跡を2軸のアクチュエータ軸と呼ぶことにする(図 55)。図 55 のαとβはそれぞれのアクチュ エータ軸の傾きに相当する。本研究では、analysis part で求めたレーザースポットと fix point の距離をアクチュエータ軸の距離に変換し、アクチュエータの移動量を計算した。



CMOS camera image

図 55: アクチュエータ軸のイメージ。それぞれのアクチュエータを動かしたときのレーザース ポットの位置の変化。

ここでアクチュエータの移動量は角度 $\alpha \ge \beta$ によるが、これらは CMOS カメラの画角とアク チュエータが取り付けてある位置の対応関係で決まる。それぞれが理想的に分割鏡に取り付け られた場合、アクチュエータは $\alpha = \beta = 30$ 度となるが、実際はそこからずれた値になり、AMC システムを行う前に測定しなければならない。 **§** 6-5 で、 $\alpha \ge \beta$ の値を測定し、 $\alpha = \beta = 30$ 度を設定した場合と測定値を設定した場合での比較を行った。

6.3.5 開発プログラム

以上のアクチュエータ操作プログラムと計算方法で、AMC で用いるプログラムを開発した。 プログラムのフローチャートを図 56 に記す。



図 56: actuator part のフローチャート。

§5-2の analysis part からの分岐として、決定したレーザースポットの位置が事前に指定した範囲の外側にある場合、actuator part に来る。actuator part では、まず1軸フリーのアクチュエータの位置を見て移動量を計算し、アクチュエータに動作指示を送る。アクチュエータが動いている最中はアクチュエータ位置の読み取りはできないので、1軸フリーのアクチュエータを指示したら2軸フリーのアクチュエータの移動量を計算し、動作指示を送る。移動指示が終わったら、確認のために位置確認を行う。両軸共に動作が正常に行われていれば、次の分割鏡の補正に向かう。アクチュエータが指示を受け付けていない場合や指定した位置とは異なる場所に移動してしまった場合、再度アクチュエータに指示を送り位置確認を行う。5回以上行っても指定した位置にアクチュエータが移動しない場合、確認の動作を取りやめ次の分割鏡に進む。

以上が AMC システムの capture part、analysis part、actuator part の内容である。次節では、上記以外の AMC システムに用いる装置を紹介する。

6.4 その他の AMC 装置

AMCの運用において、CMOSカメラやアクチュエータの電源をどうするか、ソフトウェアの動作管理をどうするかというのは重要な問題である。ここでは、上記3つのpartの装置やプログラムを操作する際の装置を紹介する。

6.4.1 赤外線レーザー

AMCシステムでは望遠鏡主鏡中心から照射するレーザーに赤外線(IR)レーザーを用いる (図 57)。IR レーザーを用いる理由として、主に他の波長に比ベレイリー散乱の影響を受けに くいことがある。本研究の測定実験では、波長 785nm、ビーム発散角 0.6×0.3mrad のものを使 用した。図 58 は、28 m 先に照射したレーザーのスポットである。



図 57: 赤外線レーザー。

6.4.2 CMOS カメラのケース

実際の運用では、分割鏡に取り付ける CMOS カメラは雨風から守るためにケースに入れられる。このケースは IP68 で作られ、雨風に対して非常に強固なものになっている(図 59)。IP68 とは容器に関する工業規格の一つで、数字の十の位が人体および固形物に対する保護等級で、 一の位が水の浸入に対する保護等級である。それぞれ0から6、0から8で表される。IP68 という数字はその中でも最高位のランクで、粉塵が容器内に入らない、かつ連続的に水中に置いても使用可能というものになっている。ただし、本研究における測定ではこのケースは用いていない。

6.4.3 ボード PC

CTA LST では AMC システムの運用をボード PC を使って運用する。本研究で使用したボード PC の主な性能と形状を表 8 と図 60 に記す。



図 58: 赤外線レーザーの 28 m 先での様子。

6.4.4 PoEハブ

分割鏡に接続した CMOS カメラは Power over Ethernet (PoE)を用いて電力を供給する。そのため、本研究では PoE による接続の可能なイーサネットハブを用いた(図 61)。

6.4.5 AMC ボックス

上記のボード PC や PoE ハブは、電源と共に IP66 の金属ケースに入れる。IP66 は粉塵に対 する耐性と波浪などのいかなる方向からの水の影響を受けても容器内に水が入らないという仕 様になっている。このケースを「AMC ボックス」を呼ぶ。この電源ボックスの中身と配置を 図 62 に載せる。

6.4.6 温湿度計

電源ボックスは IP66 という規格の元で設計がされており、基本的に外部から密閉されている。しかし、ケーブルを外に通すためボックスに穴をあけていることや気温の上下に伴う湿度の変化などにより、ボックス内に水気が及んでしまうことがある。それらを常に監視するため、ボックス内に USB 接続の温湿度計(図 63)を入れておく。この温湿度計は USB 経由でデータを取得でき、これを使ってボックス内に水が入ってきていないかを確認する。

この温湿度計を linux 上で認識できるようにライブラリをインストールし、接続と読み取り を行えるようにした。



図 59: CMOS カメラを入れる IP68 のケース。



図 60: 使用したボード PC。

Command	Description	Return value (DEBUG mode
Syntax		ON/OFF)
1	drive one step inwards (5 μ m)	position frame/none
L	drive one step inwards (1 mm)	position frame/none
r	drive one step outwards (5 μ m)	position frame/none
R	drive one step outwards (1 mm)	position frame/none
С	Cycle: drive 3 mm inwards, then 3	position frame/none
	mm outwards	
<	Drive inwards until jammed or	After each step: position
	character received	frame/none
>	Drive outwards until jammed or	After each step: position
	character received	frame/none
Рххуу	Programmed drive: goto position	position frame/none
	xxyy with xx being in units of	
	'mm' and yy in units of 1/256th	
	of 1 mm	
#	Re-calibrate actuator: drive all	Calibration progress
	inwards until mechanical limit	
	rewrite internal lookup table	
	(LUT)	
V	Print version number	'AMC control, C Firmware 2.03
V	Print version number	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12'
V Dxx	Print version number Set stepper motor delay to xx ms	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms'
V Dxx d	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delay	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms'
V Dxx d Mxxyyzz	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx:	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz'
V Dxx d Mxxyyzz	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx:elevation angle yy: actuator posi-	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz'
V Dxx d Mxxyyzz	Print version number Set stepper motor delay to xx ms Read back stepper motor delay Write elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi-	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz'
V Dxx d Mxxyyzz	Print version number Set stepper motor delay to xx ms Read back stepper motor delay Write elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)	'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz'
V Dxx d Mxxyyzz mxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx:elevation angle yy: actuator position (mm value) zz: actuator position (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table:	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of
V Dxx d Mxxyyzz mxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx:elevation angle yy: actuator position (mm value) zz: actuator position (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table:xx: elevation angle (integer)	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele-
V Dxx d Mxxyyzz mxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx:elevation angle yy: actuator position (mm value) zz: actuator position (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table:xx: elevation angle (integer)	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the elevation table)
V Dxx d Mxxyyzz mxx T	Print version number Set stepper motor delay to xx ms Read back stepper motor delay Write elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm) Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer) Read internal temperature of actu-	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example)
V Dxx d Mxxyyzz mxx T	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- ator	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example)
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el-	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el- evation angle xx from elevation	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el- evation angle xx from elevation lookup table	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx !	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el- evation angle xx from elevation lookup tableToggle DEBUG mode	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none 'DEBUG ON'/'DEBUG OFF'
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx ! p	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el- evation angle xx from elevation lookup tableToggle DEBUG modePrint current position	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none 'DEBUG ON'/'DEBUG OFF' position frame
V Dxx d Mxxyyzz mxx T Gxx ! p \$	Print version numberSet stepper motor delay to xx msRead back stepper motor delayWrite elevation lookup table: xx: elevation angle yy: actuator posi- tion (mm value) zz: actuator posi- tion (1/256th of 1 mm)Read back elevation lookup table: xx: elevation angle (integer)Read internal temperature of actu- atorgoto position associated with el- evation angle xx from elevation lookup tableToggle DEBUG modePrint current positionBinary memory dump of elevation	 'AMC control, C Firmware 2.03 08/2.12' 'Delay: xx ms' 'Delay: xx ms' 'Verify: xx yy zz' 'Verify: xx yy zz' (yy zz being of same format as for writing the ele- vation table) '+25.5' (example) position frame/none 'DEBUG ON'/'DEBUG OFF' position frame 180 characters, 2 characters each

表 6: LST アクチュエータの通信仕様。

	CI: IID 00 //	/ 12 人 20
変更するパラメータ	デフォルト値	変更後の値
DH	0	13A200
DL	0	FFFF
CE	0	1(coordinater enable)
A2	0	6(coordinater association)
AP	0	2(api mode with escape enable)

表 7: XBee パラメータの変更。

表 8: ボード PC"PCM3363"の主な性能。 [28]

CPU	Intel Atom N455 Single Core 1.66 GHz
Memmory	1GB DDR3 800 MHz Memory
USB	$4 \times \text{USB } 2.0$
Ethernet	$10/100/1000 { m ~Mbps}$
Storage	1 CompactFlash socket (Type I/II)
Power	ATX/AT
Operational temp.	0 - 60 °C
Non-Operational temp.	-40 - 85 °C
Dimensions	$96 \times 90 \text{ mm}$
Weight	0.664 kg (with heat-sink)



図 61: Power over Ethernet (PoE) ハブ。



図 62: 電源ボックス内部。



図 63: 使用した USB 接続温湿度計。

7 開発プログラムの性能評価

前章でAMCシステムのソフトウェア開発について述べた。この章では、開発したプログラムの試験を行い、それらが運用可能なのか、どの程度の範囲で運用可能なのかを評価する。

7.1 CMOS カメラによるレーザースポット認識

まず CMOS カメラ自身の性能である。使用する CMOS カメラを Linux で認識し、画像取得の プログラムを動かした。また、28 m 先に照射した IR レーザーのスポットが、どのように CMOS カメラの画角内に映し出されるかを確認した。実際に取得した画像は図 64、図 65 である。図 64 は明るいときの図 65 の画像である。こちらは CMOS カメラで撮った画像ではないので注意 されたい。図 65 の拡大図が図 66 である。このスポットを解析し、スポット位置を決定する。図 67 は実験のセットアップのイラストである。



図 64: レーザースポットを写すボードとその周囲の風景。



picture of image data

図 65:28 m 先のレーザースポット画像。



図 66: レーザースポットの拡大画像。

7.2 CMOS カメラ及びレーザースポット解析のテスト

CMOS カメラで十分にレーザースポットを撮像することがわかった。次に analysis part の性能を確かめた。AMC システムに求められるレーザースポットの決定精度は 0.5 ピクセルである。開発したプログラムがその精度を満たさなければ、AMC システムの補正プログラムとして使用できない。そこで CMOS カメラで取得した画像データを用いて、レーザースポット同定プログラムを走らせ、スポット決定の精度を確かめた。CMOS カメラの設定として、 gain = 1、 framerate = 10 とし、exposure を 10、100、1000、3000、6000、9000、10000 μ s と値を変え



図 67: 実験のセットアップ。

て28m先に照射したレーザースポットを、それぞれ100枚の画像を取得した。この画像を解析 し、スポット位置の平均と標準偏差、またパラメータの値を比較することで、レーザースポッ トの精度と同定に用いるパラメータの選定を行った。図68に測定結果を載せる。

結果より、この CMOS カメラは exposure= 10μ s と 100μ s のときにピクセルの最大値やレー ザースポットのサイズに差は見られない。これは exposure が小さいため設定した exposure 値 ではなく、それより長い exposure 値で画像を撮っているものと思われる。CMOS カメラの設定 としては可能であるようだが、実際の運用でここまで小さい exposure 値では測定してはいけな いようである。以下の考察に、exposure=10、 100μ s は含めないものとする。

次に、レーザースポットの位置を見てみる。レーザースポットの位置座標の標準偏差を見る と、どれも要求値の0.5ピクセルを下回っている(前述の通り、exposure=10、100µs は含めな い)。この位置座標は重み付き重心の計算方法で求めているが、この方法で十分に要求値を満 たしていることが分かった

そしてレーザースポットのパラメータであるが、まず width、length に注目したい。これら は exposure に対し、常に一定の値を持っている。これは exposure の上昇につれ、パラメータ 計算に使うしきい値も上がるためである。前述の通り、しきい値は最大ピクセル値の 10 分の 1 の値を用いる。実際に運用において exposure は動的に値を変えるため、レーザースポットの同 定では exposure によらない値が必要である。この width と length はレーザースポットの同 定では exposure によらない値が必要である。この width と length はレーザースポットの決定 に使うことができると言える。また、レーザースポットが円形になるかどうかは、赤外線レー ザーの向きによる。そのため、事前に CMOS カメラと赤外線レーザーの向きが分かれば、レー ザースポットが円形か楕円形がが分かり、width と length の値の関係も分かる。この 2 つの値 の差、もしくは楕円度の値もレーザースポットの決定に使うことができる。

レーザースポットのサイズとピクセルの最大値は exposure 値に依存して大きくなる。これら は exposure に依存するため、単体ではレーザースポットの同定には使うことはできない。しか し、使用しているレーザーはガウシアンビームであるため、レーザースポットもガウシアン分 布になる。よって、レーザースポットのサイズはスポットのピーク値、つまりピクセルの最大 値に比例する。このことから、サイズと最大値の比は一定になるはずである。図 68 のみ右端の 値に計算結果を入れた。exposure>9000µでは、最大値がサチュレーションしているため異なる 値になっているが、それ以外は同値に近い値となる。BG についても、この測定時の BG のほ

平均值								
	exposure	∞座標	y座標	width	length	サイズ	最大値	サイズ/最大値
	10	644.34	614.45	10.24	12.11	1.62×10^3	18.9	86
	100	645.03	614.52	10.73	12.47	1688	17.5	96.8
	1000	645.37	614.72	3.53	4.43	4147	51.6	80.5
	3000	645.66	614.75	3.27	3.42	11396	132.3	86.1
	6000	646.312	614.246	3.26	3.43	21995	247.4	88.9
	9000	646.520	614.152	3.45	3.66	31375	255	123.04
	1 0 0 0 0	645.877	614.573	3.54	3.73	33690	255	132.12
標準偏差								
	exposure	×座標	y座標	width	length	サイズ	最大値	サイズ/最大値
	10	0.35	0.53	0.96	0.71	0.16×10^3	1.3	12
	100	0.51	0.69	0.67	0.46	99	0.98	7.7
	1000	0.11	0.12	0.34	0.33	55	1.6	3.1
	3000	0.11	0.10	0.27	0.023	63	2.5	1.8
	6000	0.078	0.062	0.27	0.016	77	3.4	1.4
	9000	0.084	0.067	0.28	0.012	86	0	0.34
	1 0000	0.080	0.095	0.28	0.011	86	0	0.34

図 68: レーザースポットに関するパラメータ計算の結果。上表が平均値、下表が標準偏差値。

とんどがしきい値以下の値であり、本測定に関しては十分にBGをカットできた。よって、この比の値もレーザースポットの同定に使用できると言える。

以下の測定のうち、レーザースポット同定を必要とする測定に置いては、次の条件を課した。

(1) 2 < width (intermatting < 8, 2 < lesgth (intermatting < 8)

- (2) |width ($\hat{u} length$ ($\hat{u} | < 3$)
- (3) 30 < size/maxpixel < 100

これらがこの測定から得られたレーザースポット同定に使うことができる値である。

7.3 LST アクチュエータのテスト

§4-3 で述べたように、本研究初期の段階では MST アクチュエータを使いプログラム開発を 行っていた。そのため、LST アクチュエータが Zurich 大学から LST アクチュエータが届いた 後、今まで開発していたソフトウェアでアクチュエータが正常に動作するか試験を行う必要が あった。そこで1個のアクチュエータに actuator part の動作を 10000 回行い、時間を測定した。 ここでアクチュエータの移動量は 16 step とし、30 turn を超えたら縮ませ、5 turn を下回った ら伸ばすように動かした。結果を図 69 に示す。

ほとんどの場合において、1つの動作に対し500 ms以下で動作を終えた。いくつかの動作で 平均に1秒加えた形の時間がかかっているが、これはXBeeの設定されている timeout 時間が 1 sec であるため、その影響と思われる。この timeout 時間はさらに短く出来ると思われるが、 本測定では全て1 sec で行った。



図 69: アクチュエータを10000 回動かしたときの個々の動作時間。

timeoutの影響、つまり1回の通信でアクチュエータと通信ができず再度通信をしている場合があるが、おおむね正常に動作した。LSTアクチュエータの動作は、MSTアクチュエータのために開発したプログラムで問題なく動作することが確かめられた。

7.4 ボード PC 上でのプログラムに要する時間測定

上記の測定に使用したプログラムをボードPC上で走らせ、その時間を測定した。AMCシス テムの開発に置いて、最も重要な条件の一つが「できる限り早く分割鏡を補正する」というも のである。そのため、ボードPCでプログラムを動かしたときの時間を測定し、それが極端に 遅くなる場合プログラムを改良する必要が出てくる。本項では、ボードPCを用いた開発プロ グラムの時間測定の結果を紹介する。

まず capture part についての時間測定である。行った動作として、capture part における画像取得の部分を100回連続で行い、1回の時間をミリ秒で測定した。結果を図70に示す。

ほどんどの動作に置いて、200 ms 以内で測定を終えており、平均も 195.4 ms となっている。 数回ほど倍以上の時間がかかっているが、これは画像取得に失敗し再撮像を行っているためで ある。capture part においては 200 ms で画像取得を終えられると考えて問題ないと思われる。

次に analysis part の時間測定である。ここでは、§7-2 で用いた画像データのうち、レーザー スポットがサチュレーションを起こしていない exposure=1000 µs、3000 µs、6000 µs のものを ボード PC に移動し、それを読み取って解析した。測定した範囲は「最大値の探索」、「レーザー スポットパラメータの計算」である。結果を図 71、図 72、図 73 に示す。

いずれの場合も計算時間は1.3 ms 程度となっている。これは前述の capture part や後述する actuator part に要する時間に比べて、2桁小さい。よって analysis part に要する時間が全体の 補正時間に大きな影響を与える可能性は少ないと考えられる。

最後に actuator part である。アクチュエータの動作には位置の読み取り、移動距離の計算、



図 70: ボード PC 上での capture part の時間測定。



time of laser spot search at 'exposure=1000(us)' on boardPC

図 71: ボード PC 上での analysis part の時間測定 (exposure=1000mus)。

移動指示がある。ここでは、位置の読み取りのみ、移動距離の計算、移動指示+位置の読み取りの3ケースを10000回行い、それぞれに要した時間を測定した。



図 72: ボード PC 上での analysis part の時間測定 (exposure=3000mus)。



time of laser spot search at 'exposure=6000(us)' on boardPC

図 73: ボード PC 上での analysis part の時間測定 (exposure=6000mus)。

まず位置の読み取りの動作の時間測定結果を図74に示す。結果から、アクチュエータの位置の読み取りには180 ms 程度の時間を要している。位置確認のみで180 ms の時間を要している

ため、これがアクチュエータ動作時間の最小値となる。



time of read position on boardPC

図 74: ボード PC 上でのアクチュエータの位置読み取りの時間測定。

次に移動距離の計算の時間測定結果を図 75 に示す。図 75 より、この動作の時間はナノ秒単 位であり他の動作に比べ十分短い。補正量計算については、アクチュエータ動作を行ううえで、 補正時間にほとんど影響しないと考えられる。

最後に移動指示+位置の読み取りである。ここでは、アクチュエータを16 step 移動させその 直後に位置確認を行う、という範囲で時間を測定した。結果を図76 に示す。結果からアクチュ エータを動かす際、相応の時間を要することになる。ここでアクチュエータが動いている時間 を考える。アクチュエータの速度は128 step/s であり、16 step の動作では 0.125 s の時間を要 する。今回の動作時間の結果は461.8 ms なので、移動指示と位置確認に 336.8 ms の時間がか かっていたことになる。上記の測定で位置確認に要した時間は178.5 ms であったことから、位 置移動を含めた場合、位置確認のみの動作時間に160 ms 程度の時間が加わることになる。

以上の結果より、1枚の分割鏡の補正に要する時間は1.2秒程度、13枚のクラスターすべて を補正するのに要する時間は16秒程度となる。

7.5 CMOS カメラの画角とアクチュエータ軸の対応関係の測定

上記の測定で個々の装置に対する精度や性能を理解した。しかし、補正プログラムは capture part、analysis part、actuator part の3つ全てを組み合わせなければならない。そこで問題に なってくるのが、CMOS カメラから得るレーザースポットの位置をどのようにアクチュエータ の動作に変換するかである。§4-3 で具体的な補正量の計算は述べているが、この方法で用いる α と β は CMOS カメラとアクチュエータの位置関係で変わる値である。本項では、以下に述べ



図 76: ボードPC上でアクチュエータの位置移動+位置読み取りの時間測定。

る測定方法で α と β の関係、つまり CMOS カメラとアクチュエータの関係を測定で求められるかを測定した。

測定方法として、片方のアクチュエータを固定しもう一方のアクチュエータを3 turn 目から33 turn 目まで16 step 刻みに動かした。それぞれのアクチュエータの位置で画像を撮りレーザースポットの位置を取得した。このスポットでできた線が§6-3 で述べたアクチュエータ軸である。これを両方のアクチュエータに行い、それぞれのアクチュエータ軸を求めた。1軸フリーのアクチュエータを動かした場合と2軸フリーのアクチュエータを動かした場合のそれぞれのレーザースポットの移動位置を図??



図 77:1軸フリーのアクチュエータを動かしたときの画角内のレーザースポット位置。



図 78:2軸フリーのアクチュエータを動かしたときの画角内のレーザースポット位置。

また、図 80 と図 81 はそれぞれのフィットした一次直線からの残差である。 図の残差がこのような形になっているのは、アクチュエータの取り付けてあるジンバルの影響であり、これが十分小さいかどうかがこのキャリブレーションの重要なところとなる。


図 79: それぞれのアクチュエータを動かしたときの画角全体から見たレーザースポット位置 (黒:1軸、青:2軸)。



residual from linear function at 1-axis free

図 80:1軸フリーアクチュエータの測定値の一次直線からの残差。

残差の値をみると、アクチュエータの端側で0.4 ピクセル程度の大きな値となっているが、中 心付近ではおよそ0.2 ピクセル以内に収まっている。将来的にはこちらの補正は必要であるが、 今回の測定では一次近似の値を用いて、以下の測定を行った。



residual from linear function at 2-axis free

図 81:2軸フリーアクチュエータの測定値の一次直線からの残差。

7.6 補正プログラムの動作試験

上記の方法で CMOS カメラとアクチュエータの対応関係がわかったので、その値を用いた補 正プログラムの測定試験を行う。本測定で用いた方法として、あらかじめ fix point の値に入力 しレーザースポットが fix point から x 以内の距離にあれば、補正できたと判断し動作を終了す る。そうでない場合、その範囲にレーザースポットが到達するまで capture、analysis、actuator 動作を繰り返す。

この測定に必要なものとして、fix point からどの程度の範囲にレーザースポットがあれば、 正常に補正されたとするかである。CMOS カメラやアクチュエータの精度の点からレーザース ポットの位置は分布を持つ。補正範囲を小さくしすぎると、アクチュエータが常に伸び縮みす るような動作をしてしまう。

本測定では、レーザースポットが fix point から 0.5 ピクセル以内の距離(AMC システムの要求値から得られる値)と 0.1 ピクセル以内(画像取得と解析の精度の 1 σ)の距離の位置にあれば補正された、とする 2 つの測定を行った。

7.6.1 スポット決定範囲 0.5 ピクセル

結果として、1回のアクチュエータ動作で補正できた。補正量は、レーザースポットの距離 として数十ピクセル程度の位置から、fix pointまで補正した。レーザースポット決定精度が0.1 ピクセル、キャリブレーションの一次近似から0.2ピクセル程度の誤差であったので、アクチュ エータ位置が中心付近であれば、現在の方法で要求精度を満たす結果となった。

7.6.2 スポット決定範囲 0.1 ピクセル

補正精度の範囲を 0.1 ピクセル以内としたときの補正回数を測定した。結果として、補正するのに複数回のアクチュエータ動作を要した。その例を図 82 に示す。



moving laser spot to fix point(630,610) in image data

図 82: 補正プログラム実行時のレーザースポットの動きの例。*印はスポット重心。目標値は (630, 610)。

7.7 補正プログラムの性能測定

上記の測定に置いて、開発したプログラムが正常に動作することを確認した。しかし、CTA LST で AMC システムを運用する際は1回や2回ではなく、観測中常にプログラムを動かし分 割鏡を補正しなければならない。よって、この補正プログラムを動かし、毎画像取得から得ら れるレーザースポットの位置が fix point とは異なる位置にあった場合、fix point との距離を計 算しこれを補正しなければならない。

本測定では、補正プログラムを200回動かし、レーザースポットの位置を補正させた。測定 ではまず、アクチュエータをランダムに動かし、分割鏡を方向をずらした。アクチュエータを ランダムに動かし、移動後の位置でCMOSカメラに映るレーザースポットの位置を図83に示 す。これらの位置から fix point(本測定では(600,650)に固定)にレーザースポットの位置 を補正する。

次に、補正プログラムによって1回だけアクチュエータを動かした後のレーザースポットの 位置、及び2回アクチュエータの動かした後のレーザースポットの位置を図84に示す。ここで *印は1回のみ、赤丸は2回アクチュエータを動かした後のレーザースポットの位置である。本 測定では、レーザースポットの位置とfix pointの距離が0.5 ピクセル未満であれば、分割鏡の



図 83: ランダムに動かした後のレーザースポットの位置。

方向を補正できたものとした。図84から、200回の動作のほとんどは分割鏡の補正に2回のア クチュエータ動作を要していることがわかる。また、レーザースポット位置の軌跡を図85に示 す。図85から、レーザースポットは1回目の補正ではfix pointに届いていないことが分かる。 このことから1回の補正で分割鏡方向を補正できていない要因としては、レーザースポット位 置の決定精度やアクチュエータの機械的な遊びではなく、補正量の計算によるものが大きいと 考えられる。

補正前のレーザースポットの位置と fix point との距離を図 86 に、1 回目のアクチュエータ移動後のレーザースポットの位置と fix point との距離を図 87 に、2 回目のアクチュエータ移動後のレーザースポットの位置と fix point との距離を図 88 に示す。図より、1 回の補正でレーザースポットの位置が平均 1.3 ピクセルまで近づき、2 回目の補正では平均 0.11 ピクセルまで近づ いていることがわかる。

レーザースポット位置の決定精度は0.5 ピクセルよりの小さい。にもかかわらず、レーザー スポット位置が1回の補正でできていないのは、補正量の計算に修正点があるためと思われる。 補正量計算の修正点としては、§7-5の測定結果で得た残差の影響、つまりアクチュエータ移動 に伴うレーザースポットの位置の移動が直線からずれている影響がある。特にアクチュエータ が端に近い位置にある場合、近似直線から0.3 - 0.5 ピクセルずれている。今回の測定ではアク チュエータを両端まで移動させたため、この影響を大きく受けていると思われる。

また、今回の測定での補正量計算ではアクチュエータの位置によらず、アクチュエータ移動 量に対応するレーザースポットの移動量は一定としている。しかし、アクチュエータの移動に 伴い分割鏡は回転するため、アクチュエータの位置によって、レーザースポットの移動量は異 なる。§7-5の測定ではアクチュエータ軸の傾きの他に、アクチュエータ位置によるレーザース ポットの移動量の変化も測定することができたが、そちらは考慮しなかった。分割鏡の回転成 分を含めた補正量の計算を行えば、より少ない回数での補正が可能になると思われる。



図 84: 補正プログラムによる補正後のレーザースポットの位置(*:1回目のアクチュエータ 移動後、赤丸:2回目のアクチュエータ移動後の位置)。



laser spot position in image data

図 85: fix point 付近でのレーザースポットの位置の軌跡。



図 86: 補正前のレーザースポット位置と fix point との距離。



図 87:1回目のアクチュエータ移動後のレーザースポットの位置と fix point との距離(赤)。比較として2回目のアクチュエータ移動後のレーザースポットの位置と fix point との距離も描く(青)。



図 88: 2回目のアクチュエータ移動後のレーザースポットの位置と fix point との距離。

8 結論

8.1 AMC システム開発のまとめ

本論文では、CTA LST に使われる Active Mirror Control (AMC) システムのソフトウェア 開発と性能評価を行った。

ソフトウェア開発では、AMCシステムで用いる CMOS カメラ、アクチュエータなどの装置 をを操作するプログラムと画像を解析し素早くレーザースポットを同定するプログラムを開発 した。CMOS カメラについては、Linux 上で画像の取得、カメラ選択などの操作を行えるよう にし、今後の AMC システムの開発をスムーズに行えるようにした。レーザースポット解析で は、約百万個のピクセルからできる限り素早くスポットを特定するために、レーザースポットを 含む画像の一部を切り出しその部分のみを解析する方法を考案し、プログラムを作った。レー ザースポットを含む画像という条件として、一つ前のレーザースポットの位置を利用して選び 出し、もし切り出した画像内にレーザースポットがない場合、さらに範囲を広げて解析する方 法を取った。レーザースポットの決定にはイメージング大気チェレンコフ法に用いられている パラメータ計算を使った。アクチュエータにおいては、先行研究で開発されていたプログラム を改良し、AMC システムに適応させた。これらのプログラムを組み合わせ、一連の動作を行 うプログラムを開発した。

性能測定では、上記のプログラムがAMCシステムの目標性能を満たすかを確認した。CMOS カメラを用いて望遠鏡の焦点距離である 28 m 先に照射されたレーザースポットを撮像し、問 題なく撮れることを確認した。レーザースポットを異なる exposure で連続撮影し開発したレー ザースポット解析を行い、CMOS カメラと解析プログラムの性能を確認し、スポットの位置を 0.1 pixel 程度の範囲に特定できることを確かめた。これは AMC システムの要求精度である 0.5 piselを十分に満たす結果となった。LST 用アクチュエータの測定では、10000 回連続動作を行 い、アクチュエータが動かない場合1回の動作を0.5秒程度で終えることを確かめた。アクチュ エータの動作時間は移動量に依存するが、数 step(=数+μm)の動作では、ほとんどこの時間 と変わらないことを確かめた。また、連続測定において通信時間が通常の倍以上かかる場合が あったが、これはシリアル通信のエラーと思われる。ボード PC 上でのプログラム動作の時間 測定を行い、capture part では 200 ms 程度、analysis part は 1.3 ms 程度、actuator part は 16 step 動かした場合 460 ms 程度で動くことを確かめた。actuator part の時間はアクチュエータ に移動距離に依存するが、3つの part の時間から、1枚の分割鏡の制御に要する時間は1.2 秒程 度ということになる。13枚の分割鏡を補正する場合、すべて終えるのに16秒程度ということ になり、目標値であった全体の補正時間20秒以内をクリアする結果を得た。CMOSカメラの 画角とアクチュエータ軸のキャリブレーション測定では、CMOS カメラが分割鏡対しどの程度 傾いているかを測定し、その値を用いて補正プログラムを動かし正常に分割鏡を補正すること に成功した。補正プログラムの連続測定では、アクチュエータをランダムに動かした後分割鏡 を補正するという測定を行い、ほとんどの場合において2回以内で分割鏡を定義した方向に補 正することができた。

8.2 今後の展望

今回の研究で、AMCシステムの基礎となる部分は完成した。本研究で行った測定実験で確かめたことの内、いくつかは改良の余地がある。特に補正プログラムを用いた測定において、

分割鏡が1回で補正されなかった要因として、アクチュエータ軸のキャリブレーションの精度 が考えられる。アクチュエータの伸縮によって分割鏡ならびに CMOS カメラは曲線方向に位置 を変えるのに対し、今回のキャリブレーションでは直線に位置を変えると近似した。この方法 では近距離の補正に対しては十分でも、大きく離れた点から補正するには1回の補正では足り なくなると思われる。補正回数の変化はどの程度の距離から変わるのか、ということも調べる ことが可能と考えられる。

また、今回は1つの分割鏡に対しての測定を行った。想定されている AMC システムでの分 割鏡補正枚数は1クラスターにつき13枚なので、複数の分割鏡に対する試験も必要である。現 在マックスプランク研究所で試験用構造体が建設され、4枚の分割鏡が設置されている。これら を用いて複数の分割鏡に対する補正プログラムの性能評価が可能である。そのような試験、測 定を行い、システムを充実させた先に、CTA LST の運用される AMC システムの完成がある。

参考文献

- Aharonian, F. et al., "Primary particle acceleration above 100 TeV in the shell-type Supernova Remnant RX J1713.7-3946 with deep H.E.S.S. observations", A&A, Volume 464, p. 235 243, March II 2007.
- [2] Aliu, E., et al. "Detection of bridge emission above 50 GeV from the Crab pulsar with the MAGIC telescopes", Science, 322, 1221 2008.
- [3] Kubo H. et al., 1998, ApJ, 594, 693; Fossati G. et al., 1998, MNRAS, 299, 433
- [4] the CTA consortium, "Introduction the CTA concept", Astroparticle Physics, Volume 43, p.3. 2013
- [5] T. C. Weekes et al., "Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cherenkov imaging technique." ApJ, Vol. 342, pp. 379—395, 1989.
- [6] Nria Sidro, "Discovery of the microquasar LS I +61 303 at VHE gamma-rays with MAGIC" arXiv, 0610925v1, 2006.
- [7] Aharonian, F. et al., "First ground based measurement of atmospheric Cherenkov light from cosmic rays", arXiv, 0701766, 2007.
- [8] 野里明香, 2013年度, 近畿大学修士学位論文
- [9] 青野正裕, 2012年度, 京都大学修士学位論文
- [10] 今野裕介, 2013年度, 京都大学修士学位論文
- [11] Cherenkov Telescope Array 計画書(2010年8月30日)
- [12] Cherenkov Telescope Array 計画書(2013年7月15日)
- [13] Vollhardt, A., "LST actuator development" 2013.
- [14] "Baseline Design Document for Large Size Telescope Rev.2b" (2013 年 3 月 12 日)
- [15] M.S.Longair. High energy astrophysics. Volume 1. Cambridge University Press, third edition, 1992.
- [16] T.C.Weekes. VERY HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia
- [17] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 [編]. シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測. 日本 評論社, 2008
- [18] クラウス.グルーペン.宇宙素粒子物理学.シュプリンガージャパン, 2009.
- [19] JEM-EUSO HP (http://jemeuso.riken.jp/jp/about2.html)
- [20] MPI HP (https://www.mppmu.mpg.de/ rwagner/sources/)

- [21] TeVCat HP (http://tevcat.uchicago.edu/)
- [22] JAXA HP (http://www.isas.jaxa.jp/j/column/famous/07.shtml)
- [23] http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/cta/observation.html
- [24] http://www.cta-observatory.jp/
- [25] aravis (https://git.gnome.org/browse/aravis)
- [26] 株式会社 "The Imaging Sources" DMK23GM021 データシート
- [27] 株式会社 "オムロン" 3Z4S-LE SV-V シリーズ データシート
- [28] 株式会社 "Advantec" PCM3363 データシート

謝辞

本論文執筆にあたり、様々な方々から助言や活をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

指導教員である吉越貴紀准教授、手嶋政廣教授には研究に関して、様々な意見や助言をいた だきました。直接的な指導をしていただいた MIR グループのコーディネーターである林田将明 助教からは実験に対する心構えなどを教わりました。花畑義隆研究員、Dr. Riccardo Rando は 画像取得プログラムの作成など、様々な面で手助けをいただきました。大岡秀行技術職員、中 嶋大輔助教には研究が思うように進まなかったとき、援助していただきました。その他宇宙線 研究所 CTA グループ、CTA-Japan MIR グループの方々からはミーティングなどを通じて様々 な支援をいただきました。また、宇宙線研究所 M2 の石尾一馬君、荻野桃子さん、高橋光成君、 M1 の深見哲志君及び甲南大学 M2 の猪目裕介君には、分割鏡の取り付けなど力仕事を手伝って もらいました。特に深見君にはドイツ MPI へ行きプログラムの試験を行っていただきました。 来年以降も頑張ってください。