

令和 2 年度 修士論文

# 次世代型宇宙線観測用望遠鏡の 完全自律観測システムの開発



提出者

信州大学 大学院 総合理工学研究科工学専攻  
電子情報システム工学分野

中村 雄也

2020 年 12 月 1 日提出

# 目次

第 1 章	超高エネルギー宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.1.1	空気シャワー現象	2
1.1.2	エネルギースペクトル	4
1.1.3	異方性	4
1.1.4	質量組成	5
1.2	現行の宇宙線観測	6
1.2.1	大気蛍光望遠鏡	6
1.2.2	地表粒子検出器	8
1.3	次世代の宇宙線観測	9
第 2 章	新型大気蛍光望遠鏡	10
2.1	目的	10
2.2	CRAFFT 望遠鏡の装置構成	10
2.3	プロトタイプ CRAFFT 望遠鏡の観測性能	14
2.3.1	CRAFFT 望遠鏡と TA 実験大気蛍光望遠鏡の比較	15
2.4	CRAFFT 望遠鏡の将来計画	15
2.5	CRAFFT 望遠鏡における完全自律観測システム	16
第 3 章	新型望遠鏡の完全自律観測システム	18
3.1	完全自律観測システムの構成	18
3.2	自律観測システム	19
3.2.1	コントロールコンピュータ	20
3.2.2	FADC	21
3.2.3	リレーモジュール	23
3.2.4	ルーター	24

---

3.2.5	光電子増倍管	24
3.2.6	ローカル基盤	25
3.3	望遠鏡保護システム	27
3.3.1	保護用シャッター	27
3.3.2	シャッター制御用回路	31
3.4	電力自給システム	32
3.4.1	電力消費量と給電能力の比較	33
3.5	完全自律観測システムのソフトウェア構成	35
<b>第4章</b>	<b>新型望遠鏡の環境モニタリングシステム</b>	<b>38</b>
4.1	WXT ウェザートランスミッタ	38
4.2	簡易モニタ	41
4.2.1	風速モニタ	42
4.2.2	降水モニタ	43
4.2.3	湿度モニタ	44
4.2.4	輝度モニタ	44
4.3	簡易モニタの評価	46
4.3.1	風速モニタの評価	47
4.3.2	降雨モニタの評価	48
4.3.3	輝度モニタの評価	49
4.4	シャッターモニタシステム	50
4.5	ソフトウェア構成	51
<b>第5章</b>	<b>完全自律運用試験</b>	<b>53</b>
5.1	試験での装置構成	53
5.2	試験結果	54
5.2.1	試験で得られた問題点	56
<b>第6章</b>	<b>新型望遠鏡の観測判断システム</b>	<b>58</b>
6.1	観測判断に用いるパラメータ	58
6.2	観測判断のフローチャート	58
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>60</b>
7.1	まとめ	60
7.2	今後の展望	60

参考文献

62

謝辭

63

## 第 1 章

# 超高エネルギー宇宙線

### 1.1 宇宙線

1912 年にオーストリアの物理学者である V.F.Hess は、気球を用いて実験を行い宇宙から降り注ぐ放射線の存在を発見した。これはのちに宇宙線と呼ばれ、この実験がその後の宇宙線天文学の幕開けとなった。宇宙線は宇宙から地球に絶えず降り注いでおり構成粒子もエネルギーも多様である。低いエネルギーの宇宙線であれば太陽からも宇宙線が到来していることがわかっており、その構成粒子は原子核・陽子・電子・光子など様々である。一方で高いエネルギーの宇宙線は未だほとんどのことが明らかになっておらず、中でも超高エネルギー宇宙線は、超新星爆発など宇宙でも特異な極高エネルギー現象に起源を持つと言われているが具体的なことは宇宙線発見から 100 年以上経過した現在でも明らかにはなっていない。

宇宙線のエネルギースペクトルを図 1.1 に示す。宇宙線のエネルギーが増すにつれ到来頻度が急激に減ることがわかる。特に  $10^{18}$  eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線は超高エネルギー宇宙線と呼ばれ、その頻度は  $100\text{km}^2$  あたり年間 1 粒子程度という極めて稀な事象となる。一方で、超高エネルギー宇宙線は銀河磁場によってほとんど曲がることがない。宇宙線のエネルギーと銀河磁場中での振る舞いの様子を図 1.2 に示す。低いエネルギーの宇宙線は銀河磁場によって進行方向を曲げられ到来方向の情報をほとんど失うのに比べ超高エネルギー宇宙線は銀河磁場中もほぼ直進できる。そのため観測することによって宇宙線の起源天体を特定することができると考えられている。

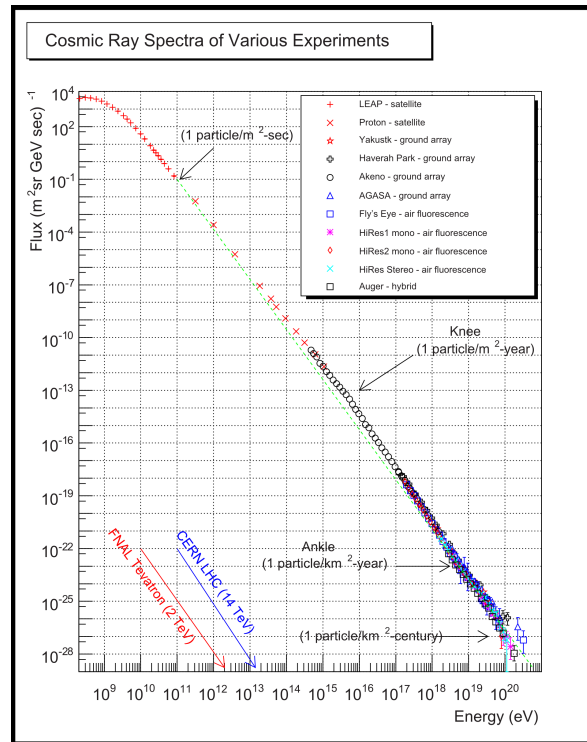


図 1.1 宇宙線のエネルギースペクトル [2]

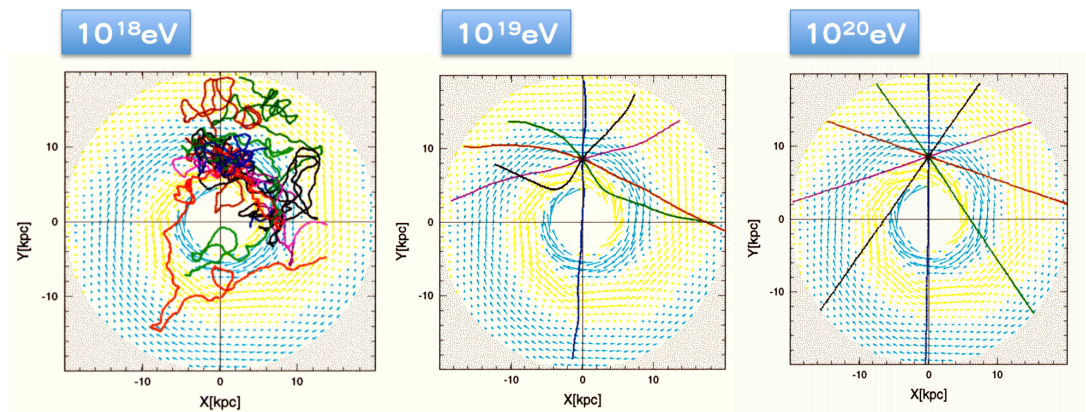


図 1.2 銀河磁場が宇宙線の到来方向に与える影響 [3]

### 1.1.1 空気シャワー現象

宇宙線が地球の大気に突入した際に、大気を構成する元素と互いに相互作用を起こして分裂することで2次宇宙線を生成する。2次宇宙線は空気シャワーとも呼ば

れ、宇宙線観測における重要な情報源となる。空気シャワーの発達過程を図 1.3 に示す。大気に突入した空気シャワーは大気の頂点で最初のインタラクションを起こす。これはおよそ地上 100km 付近とされているがインタラクションは確率で起こるため必ずしもこの限りではない。インタラクションを起こした粒子はそれぞれ二次粒子を生成してエネルギーを分配する。エネルギーを分配された粒子はそれぞれが再び次の大気分子と相互作用を起こして二次粒子を生成する。これを繰り返すことで二次粒子がシャワー状に地表に降り注ぐ。高エネルギー宇宙線による空気シャワー現象では電子やハドロン、ミューオンなど様々な二次粒子が生成されるが、二次粒子は相互作用や崩壊を繰り返し最終的には大部分が電子と陽電子になる。また、空気シャワーはある程度まで発達すると二次粒子の生成が減ることでシャワーが収束していく。この最大発達点を最大発達深さ ( $X_{max}$ ) と呼ぶ。  $X_{max}$  は宇宙線のエネルギーと質量組成に依存する。エネルギーが大きいほど  $X_{max}$  は大きくなり、質量組成が重く、多くの原子で構成されているほど  $X_{max}$  は小さくなることわがわっている。したがって空気シャワーの形状を探って  $X_{max}$  を調べることで 1 次宇宙線の構成原子を知るきっかけとなる。

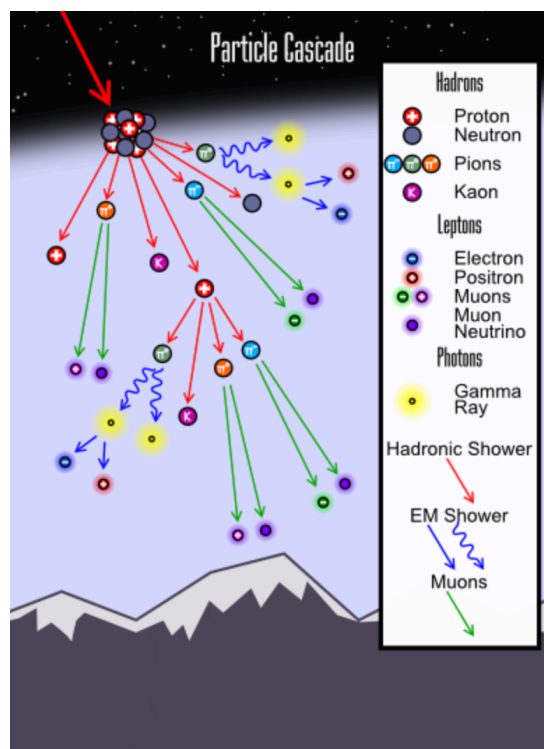


図 1.3 宇宙線空気シャワーの模式図 [4]

### 1.1.2 エネルギースペクトル

宇宙線のエネルギースペクトルを、わかりやすいように3乗したものを図1.4に示す。特に超高エネルギー宇宙線領域で  $10^{18}\text{eV}\sim 10^{19}\text{eV}$  付近に頻度の変化が緩やかになる区間が見られるが、これは Ankle と呼ばれる区間で、到来した宇宙線の起源が我々の住む銀河系内から銀河系外に変化したものと考えられている。

宇宙線のエネルギーが  $10^{20}\text{eV}$  付近になると、GZK 限界と考えられている急激な頻度の低下が見られる。GZK 限界とは、宇宙線が宇宙背景放射のマイクロ波と相互作用を起こすことによってエネルギーを失うために地球に到来しないという予想である。この宇宙線到来頻度の激減を GZK 限界と断定するためには超高エネルギー宇宙線の組成を確定する必要がある。

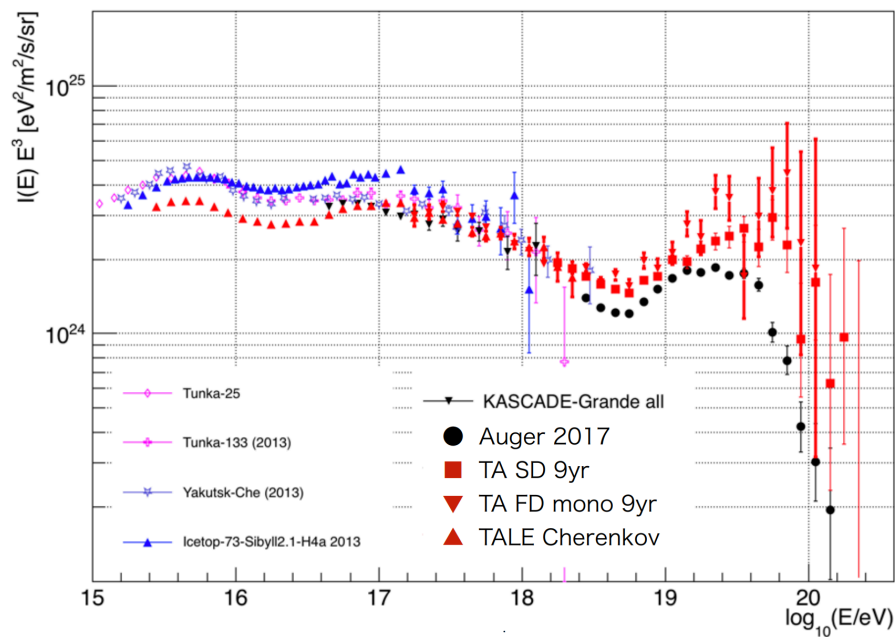


図 1.4 宇宙線のエネルギースペクトル [5]

### 1.1.3 異方性

超高エネルギー宇宙線の起源としては、活動銀河核や超新星爆発などが候補として考えられているがはっきりしたことは未だにわかっていない。先述したように、宇宙線が荷電粒子で構成されている場合、銀河磁場の影響を受けるために低エネルギーの宇宙線は到来方向の情報を失ってしまう。また、この曲がりやすさは宇宙線



の質量によっても変化する。ある程度エネルギーの高い宇宙線であれば到来方向の情報を保持できるため、異方性探索の手掛かりになると考えられている。

望遠鏡アレイ実験によって得られた、 $5.7 \times 10^{19} \text{eV}$  の宇宙線の異方性を示したカラーマッピングを図 1.5 に示す。特定の領域に宇宙線到来方向が集中しているホットスポットと呼ばれる兆候が見られることがわかる。超高エネルギー宇宙線の起源天体の有力候補が存在する超銀河面は、図中の灰色の線で示されている。ホットスポットもこの近辺に見られるため、今後の宇宙線観測によって統計量を増やすことで到来方向の異方性が確認できるのではないかと期待できる。

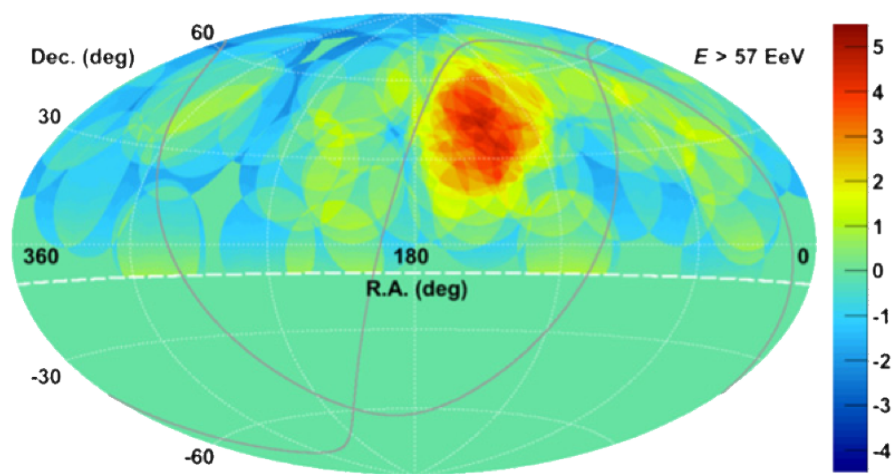


図 1.5 宇宙線到来方向の異方性 [3]

#### 1.1.4 質量組成

到来する宇宙線の構成粒子を特定することは、その起源を推測することにつながる。質量組成は宇宙線空気シャワーの  $X_{\text{max}}$  の値と深く関係する。先述したように、同一エネルギーの宇宙線であれば、1次宇宙線の構成粒子が多く、質量が重いほど  $X_{\text{max}}$  は小さくなる傾向にある。 $X_{\text{max}}$  が小さくなる理由は2つある。1つ目は構成粒子が多くなると相互作用断面積が大きくなり、大気との最初の相互作用を起こしやすくなることで結果的に  $X_{\text{max}}$  が小さくなる、ということ、2つ目は構成粒子が多いことで最初の相互作用によってより多くの粒子に分裂するため、同一エネルギーであればエネルギーの分配がより早く進行するためである。

有力とされる粒子として、陽子と鉄原子がある。それぞれの場合の  $X_{\text{max}}$  の違いは  $60 \text{g/cm}^2$  程度と考えられており、この違いを検出するためには観測できる宇

宇宙線の統計量をより増やす必要があると考えられている。

質量組成の特定は先述の GZK 限界の断定にも寄与する。現行の宇宙線観測実験である TA 実験と Auger 実験の解析結果は違うため、より詳細な解析が必要となっている。

## 1.2 現行の宇宙線観測

現行の宇宙線観測実験は大きなものとして TelescopeArray 実験, PierreAuger-Observatory が存在する。本論では TelescopeArray 実験 (以下 TA 実験) を例に現行の宇宙線観測について具体的に説明する。TA 実験はアメリカ合衆国ユタ州デルタシティの郊外 700km<sup>2</sup> にわたって観測領域が展開される国際実験で、宇宙線観測には主に 2 つの検出器が用いられる。1 つが大気蛍光望遠鏡, もう 1 つが地表粒子検出器である。それぞれの外観を図 1.6 に、大まかな特徴の比較を表 1.1 に示す。



図 1.6 大気蛍光望遠鏡 (左) と地表粒子検出器 (右) の外観 [6]

表 1.1 大気蛍光望遠鏡と地表粒子検出器の比較

項目	到来方向推定	エネルギー推定	質量組成推定	稼働時間	価格
大気蛍光望遠鏡	○	○	○	約 2.4 時間/日	2000 万円
地表粒子検出器	○	○	△	24 時間/日	150 万円

### 1.2.1 大気蛍光望遠鏡

宇宙線空気シャワーは大気を励起して非常に微弱な大気蛍光を発する。地球大気は主に窒素で構成されており、その蛍光波長は 375nm 程度の紫外光である。大気蛍光望遠鏡はこの大気蛍光を大型の反射鏡と超高感度な光検出素子の光電子増倍管で検出する宇宙線検出器である。TA 実験の大気蛍光望遠鏡の外観を図 1.7 に示

す。1台の大気蛍光望遠鏡は、反射面の口径がおよそ3m、光検出面は256本の光電子増倍管で構成され、16度程度の観測視野を有する。視野距離は宇宙線のエネルギーに依存するが超高エネルギー宇宙線であればおよそ十数kmの距離まで観測できる。このスペックの望遠鏡が12台格納された建屋を1ステーションとして、700km<sup>2</sup>の観測サイトに3ステーションが配置されている。反射鏡の集光による装置の破壊を防ぐため観測は夜に限られ、さらに月光は大気蛍光に対して極めて強い光になるため月明かりのない時間である必要もある。よって年間の稼働時間は、天候にも左右されるが全体のおよそ10%程度となる。



図 1.7 TA 実験で使用されている大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡は地表粒子検出器に対して宇宙線空気シャワーの発達過程を観測できるという特徴がある。宇宙線空気シャワーの発達過程を観測することで最大発達深さを推定することができ、これは到来した1次宇宙線宇宙線の質量組成を調べる重要な手がかりとなる。

### 1.2.2 地表粒子検出器

宇宙線空気シャワーは大気との相互作用を繰り返しながら、最終的には地表の数  $\text{km}^2$  にわたる広範囲に降り注ぐ。これをプラスチックシンチレーターという、空気シャワー粒子で光る素材で捉えて宇宙線の到来を検出するのが地表粒子検出器である。地表粒子検出器は1台150万円程度の検出器で、TA実験サイトでは500台が展開、運用されている。地表粒子検出器は基本的に24時間放置、運用するため大気蛍光望遠鏡に対して10倍の統計量をもつと言える。一方で、その特徴から大気蛍光望遠鏡より空気シャワーの発達過程の推定が難しい。



図 1.8 TA 実験で使用されている地表粒子検出器

### 1.3 次世代の宇宙線観測

現行の宇宙線観測によって到来方向についてはホットスポットと呼ばれる到来頻度のやや高い領域が存在することが示唆された。一方で超高エネルギー宇宙線の質量組成や超高エネルギー領域の宇宙線のエネルギースペクトルは未だはっきりしたことがわかっていない。これらの解明のためには極めて低い頻度の超高エネルギー宇宙線イベントをより高頻度に観測する必要がある。したがって宇宙線観測サイトをより大規模に展開することが今後必要になる。図 1.9 に示すように、実際に TA 実験でも TA × 4 計画を実行し観測領域をおよそ 4 倍に拡張している最中である。しかしさらに観測領域を展開するには望遠鏡オペレーターの問題やコストの問題が生じる。地表粒子検出機による質量組成推定の試みもあるが今のところ有効性は認められていない。これらのことから望遠鏡本体とオペレーションに必要なコストを極力抑えた低コスト型の大気蛍光望遠鏡が次世代計画の主流となっている。

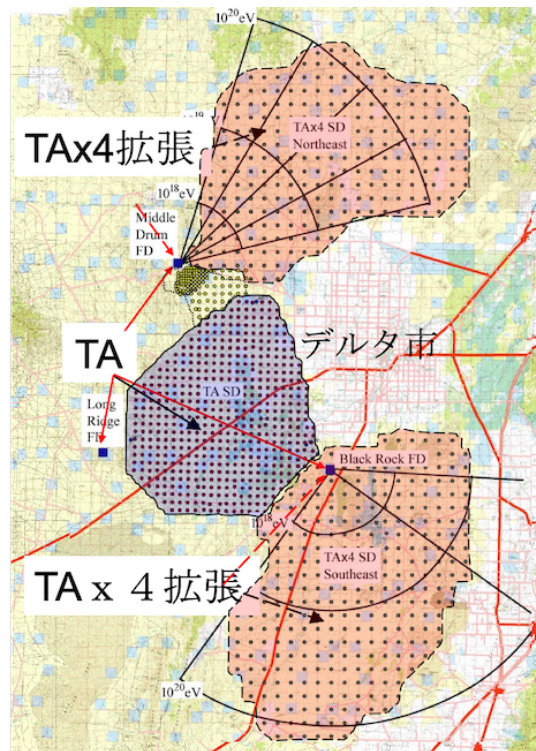


図 1.9 TAx4 計画の観測範囲の展開予定図 [7]

## 第2章

# 新型大気蛍光望遠鏡

### 2.1 目的

次世代の宇宙線観測では、宇宙線の発生源を具体的に特定するために宇宙線の組成を明らかにできることが期待される。そのためには、 $X_{\max}$  を推定できる大気蛍光望遠鏡型の検出器を広範囲に展開することで、到来頻度の極めて低い超高エネルギー宇宙線をより多く観測して、大統計解析できることが求められる。従来の大気蛍光望遠鏡は望遠鏡本体のコストと運用コストを考慮すると量産化と大規模展開が難しいため、我々は大規模展開できる、安価で完全自立稼働型の大気蛍光望遠鏡であるフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡 (Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope = CRAFFT) の開発を行っている。

### 2.2 CRAFFT 望遠鏡の装置構成

開発中の CRAFFT の外観を図 2.1 に、構成図を図 2.2 に示す。また、主要となる装置の構成を表 2.1 に示した。望遠鏡の前面には大きさ  $1.05 \times 1.4$  m の市販のフレネルレンズを設置してあり、大気蛍光を集光する。フレネルレンズとは本来焦点がレンズの内側に来るような大型で短い焦点距離のレンズなどを、素材に同心円状の溝を無数に刻むことによって極めて薄く再現したもので、解像度は落ちる一方で利点として通常のレンズに比べ焦点距離を短くできること、薄いため大型化が容易であることなどが挙げられる。このレンズを用いることで CRAFFT は大型のレンズでありながら短い焦点距離により装置を小さく保っている。また市販のものを使用することによって低コスト化も図っている。

その焦点面には紫外光透過フィルタを設置してノイズを除去する。大気蛍光が非



図 2.1 新型望遠鏡の外観

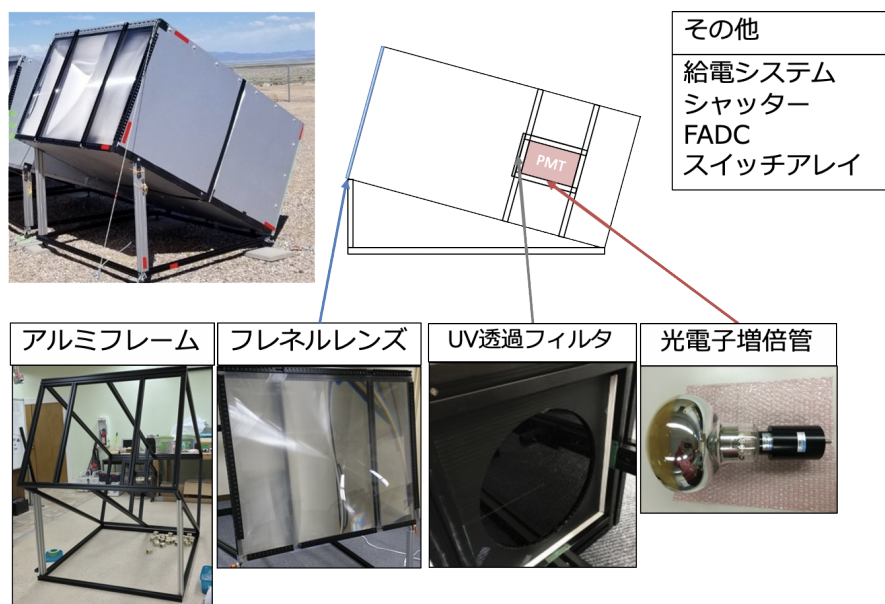


図 2.2 新型望遠鏡の構造

常に微弱な光なのに対して観測時は星や街明かりなどの様々な背景光がレンズから入り込む。そこで紫外光透過フィルタは大気蛍光の主たる紫外光以外の光をとりのぞくことによってこれらのノイズを抑制する効果がある。

その後ろに検出器として直径 203mm の光電子増倍管 (PMT) を 1 つ備え、検出した光を電気信号に変換する。PMT はわずかな光子を光電子に変換して増幅す

ることで信号を出力する高感度光素子で空気シャワーから発せられるごくわずかな大気蛍光を検出することができる。実際に使用した光電子増倍管の外観を図 2.3 に示す。また、PMT 前面に空間フィルタを挟むことにより CRAFFT 望遠鏡の視野角を 8 度に制限している。

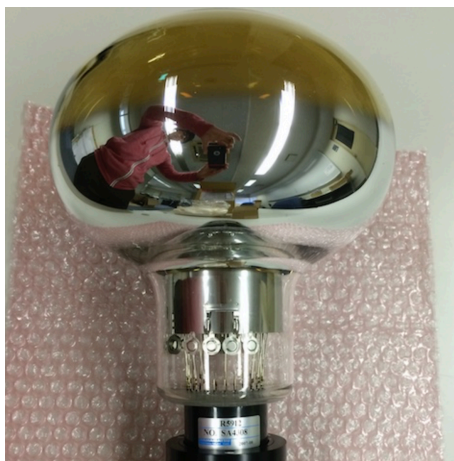


図 2.3 光電子増倍管 R5912

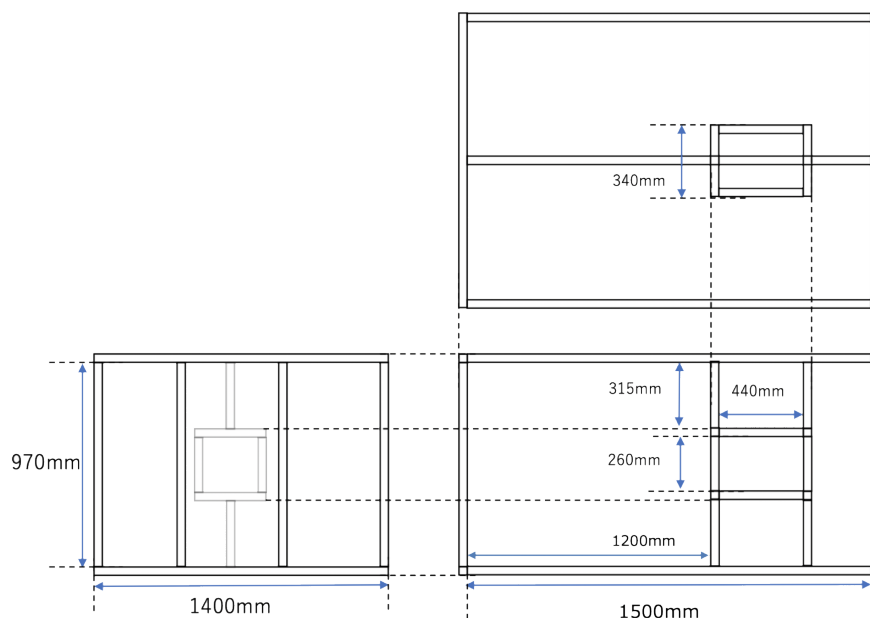


図 2.4 CRAFFT 望遠鏡のフレーム設計



図 2.4 に CRAFFT 望遠鏡のフレーム設計を示す。CRAFFT はこれら全体を市販のアルミフレームで支え、外側を遮光シートとガルバリウム板で覆うという比較的簡単な構造になっている。市販のアルミフレームは組み付けが容易であり、望遠鏡を簡単に組み立てられること、今後望遠鏡を最適化するにあたって構成を変更したとしても容易に改装できることなどの利点がある。外装のガルバリウム板は耐食性と加工性に優れた素材であるため建屋を使用しない CRAFFT 望遠鏡に適している。

加えてエレクトロニクスとして、PMT に高電圧を印加するための高圧電源素子と極めて小さい出力信号を増幅させるためのアンプ素子を含めたローカル回路基盤、装置全体を動かすために必要な装置として、装置をコントロールするための RaspberryPi, 信号を記録するための FADC ボード、電源コントロールのためのリレーモジュールなどで構成されている。これらすべてを合わせて 1 台 100 万円程度という低コストを実現している。

表 2.1 CRAFFT 望遠鏡の構成

構成部品	品名	価格
フレネルレンズ	日本特殊光学樹脂, F1200-B	4 万円
紫外光透過フィルタ	O.M.G, UL-330	6.5 万円
光電子増倍管	浜松ホトニクス, R5912	20.5 万円
アルミフレーム 遮光シート ガルバリウム板	ユキ技研, F44F	18 万円
エレキ (ローカル部) 高圧電源素子 アンプ素子	松定プレジジョン, OPTON-1.5NE-12 HAMAMATSU, M8879	6 万円
エレキ (ホスト部) コントロールコンピュータ FADC ボード リレーボード ルーター	RaspberryPi2B 特殊電子回路, Cosmo-Z NUMATOLAB, 16Ch Ethernet Relay	30 万円/4 台
給電設備	ソーラーパネル・ チャージコントローラー・バッテリー	13 万円/4 台
保護用シャッター	三和シャッター, マドモアスクリーン S	30 万円
	合計	約 100 万円

## 2.3 プロトタイプ CRAFFT 望遠鏡の観測性能

低コストで構成された新型望遠鏡について、宇宙線を検出可能であるかどうか実際に確かめるために 2017 年 11 月にアメリカ合衆国ユタ州にある TA 実験サイトにて宇宙線観測試験が行われ、宇宙線が検出可能であることが確認された。CRAFFT は 1 台あたり 3 人によって 2 日間かけて製作され、1 日で設置された。観測時間は日没で月が出ていないという条件が必要であるため 10 日間で 63.5 時間行われた。この試験では新型望遠鏡の視野が TA 望遠鏡の視野と重なるように設置して TA 望遠鏡からのトリガーによって信号を記録し、トリガーされた時刻での CRAFFT で記録された波形と TA 望遠鏡で観測できたデータを比較して宇宙線を検出できているかどうかを確かめている。

実際に新型望遠鏡で検出できた宇宙線の信号波形と対応する TA 望遠鏡での宇宙線信号の例を図 2.5 に示す。12 台の TA 望遠鏡の視野が四角形の枠で、4 台の

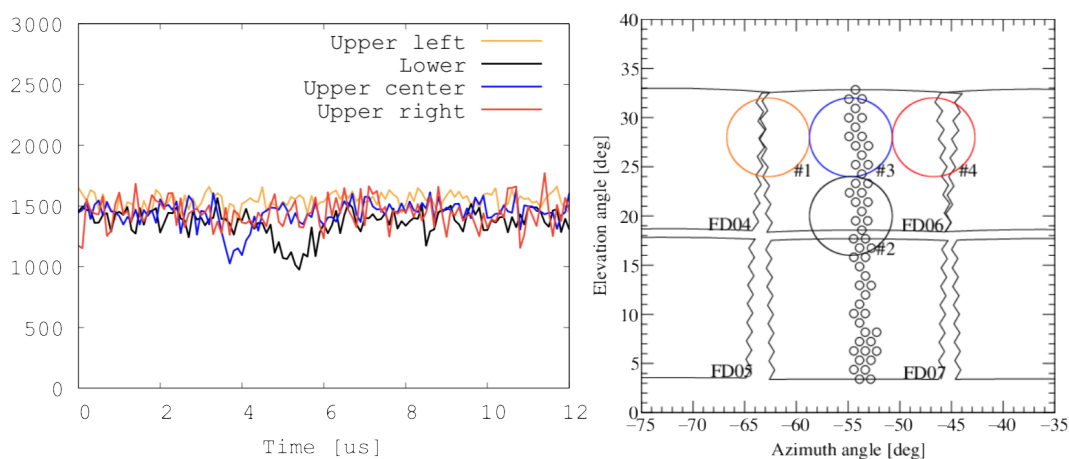


図 2.5 (左) TA 望遠鏡における観測波形 (右) 新型望遠鏡による宇宙線観測波形

新型望遠鏡の視野が赤、青、黒、黄色の 4 つの円でそれぞれ描かれている。新型望遠鏡の信号波形をみると赤と黒の信号が順番に立ち上がっている様子が確認できる。そこで同時刻の TA 望遠鏡での信号を見てみると、上から降ってくる空気シャワーによる信号が赤と黒の望遠鏡視野を縦に通過する様子を確認できる。この宇宙線のエネルギーは  $10^{17.7}$  eV ほどで、望遠鏡から距離 3.6km の地点に降っていることが TA 望遠鏡によって確認されている。1 ヶ月間の観測でこの事象を含めて新型望遠鏡が 10 事象宇宙線を検出できていることが確認された。したがって、フレネルレンズと大型 PMT によって低コストに設計された大気蛍光望遠鏡である

CRAFFT 望遠鏡でも宇宙線の信号を検出できるということが確認された。

### 2.3.1 CRAFFT 望遠鏡と TA 実験大気蛍光望遠鏡の比較

CRAFFT 望遠鏡の性能を現行の大気蛍光望遠鏡と比較したものを表 2.2 にまとめた。

表 2.2 現行大気蛍光望遠鏡との比較

	現行大気蛍光望遠鏡	新型大気蛍光望遠鏡
集光部	複合放物面鏡 有効面積 3.6m <sup>2</sup>	フレネルレンズ 有効面積 1.4m <sup>2</sup>
受光部	60mm 光電子増倍管 256 本	203mm 光電子増倍管 1 本
骨格	鉄骨	アルミフレーム
建屋	有り	無し
コスト	約 2000 万円	約 100 万円

現行の大気蛍光望遠鏡は大型の反射鏡を備えた高さ 3m 程度の反射型望遠鏡で、検出面はアレイ状に配置された 256 本の PMT で構成されている。PMT 感面のサイズは 60 mm で、アレイ状の配置によって空間分解能を高めている。1 台あたりのコストはおよそ 2000 万円でこれを複数台設置して観測を行なっている。一方で CRAFFT 望遠鏡は 1m × 1.4m 程度のフレネルレンズによって大気蛍光を集光し、203mm の光電子増倍管 1 つで検出を行う。1 台あたりのコストはおよそ 150 万円で現行の大気蛍光望遠鏡に対して 10 分の 1 程度にまで抑えられている。しかし現行の望遠鏡に対して集光率は 10% 程度で、視野は 4 分の 1 程度である。また、現行の望遠鏡は大型の建屋に 12 台設置して 1 つのステーションとして観測を行なっているのに対し、新型望遠鏡は建屋を使用せず単体で設置して観測を行う予定である。

## 2.4 CRAFFT 望遠鏡の将来計画

CRAFFT 計画は最終的には 10 万 km<sup>2</sup> 規模で望遠鏡を展開できる装置を目指す。そのために大まかに 3 段階に分けて計画を進行している。

フェーズ 1 では低コスト大気蛍光望遠鏡としての CRAFFT の検出器概念を確立する。低コストに構成されたフレネルレンズ型望遠鏡で宇宙線を検出できることが既に確認できており、現在は完全自律観測システムの構築と、観測に向けた光検出面の最適化を行っている。これらが完了次第フェーズ 2 へ移行する予定となっ

ている。フェーズ2では観測手法を確立する。フェーズ2での大きな課題としては、ステレオ観測手法の確立、観測ステーション同士の通信や観測データの通信が挙げられる。フェーズ3でCRAFFTが目指す観測範囲に望遠鏡を展開して観測を行う。この段階までで望遠鏡の量産化を実現、複数台の望遠鏡を一箇所にまとめて全方位角をカバーするように配置する望遠鏡ステーションの確立が必要となる。フェーズ3でのCRAFFT計画の展開イメージを図2.6に示す。

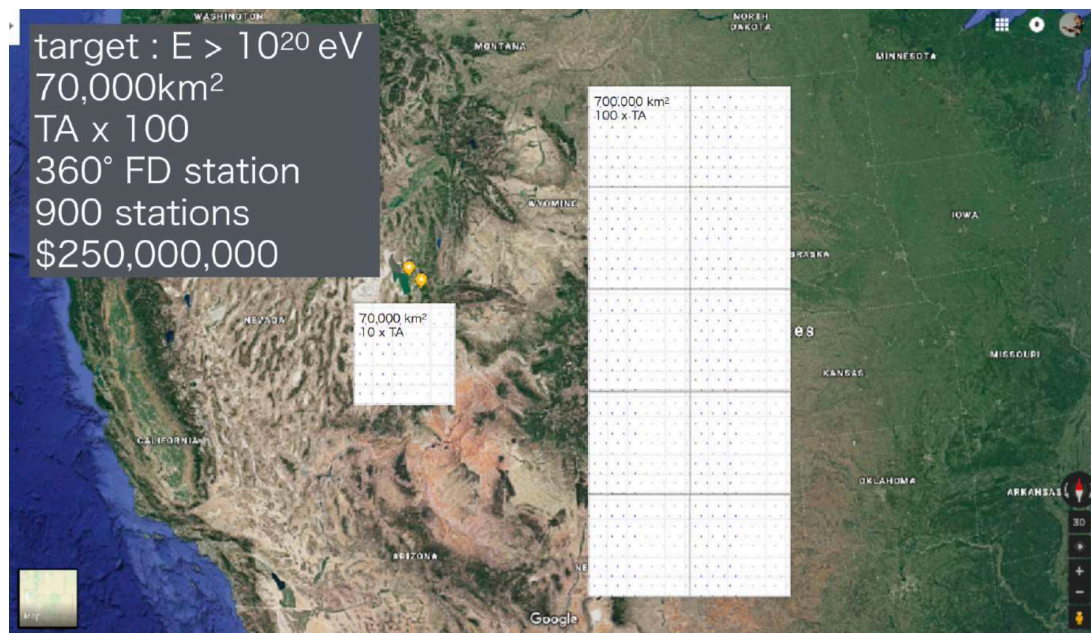


図 2.6 TA 実験を基準としたフェーズ3でのCRAFFT望遠鏡の展開範囲のイメージ

現在はフェーズ1の最終段階にあたり、低コスト望遠鏡の装置構成と、低コスト望遠鏡による最適な宇宙線観測手法、宇宙線観測望遠鏡の完全自律観測化というCRAFFT望遠鏡の概念が確立しつつある。

## 2.5 CRAFFT 望遠鏡における完全自律観測システム

現行の宇宙線観測望遠鏡は1台あたりのコストの高さから運用の際は観測者がオペレーションするのが通常で、万が一に備えて観測要員が観測サイトにアクセスできるような体制となっている。それに対してCRAFFT望遠鏡は非常に広い範囲に展開する予定となっており、その全てに観測要員を派遣する場合、運用コストがこれまで以上に莫大になってしまうという問題が発生する。また、展開範囲に合わせて観測に用いるCRAFFT望遠鏡の数も増えるためオペレーターの人数も比

例して必要になると考えられる。そこで CRAFFT 望遠鏡では今後の望遠鏡の大規模展開のために運用コストを削減できるようフェーズ 1 で宇宙線観測の完全自律化を目指している。観測の自律化には望遠鏡に自動で電力を供給するシステム、観測を自動で開始して自動で終了する自動観測システム、望遠鏡内部を太陽光から守る保護システムなどが必要となるため、その構築、試験を行なった。

## 第3章

# 新型望遠鏡の完全自律観測システム

CRAFFT では到来頻度の低い超高エネルギー宇宙線を高頻度にとらえるために、現行の観測範囲よりさらに広範囲に大気蛍光望遠鏡を展開する必要がある。望遠鏡単体のコストはこれまでの設計で十分に抑えられているため、望遠鏡の運用コストを十分に抑えるためにその観測活動を完全自律化する必要がある。

### 3.1 完全自律観測システムの構成

CRAFFT 望遠鏡の完全自律観測システムの概要図を図 3.1 に示す。本システムは大まかに、自律観測システム、電力自給システム、望遠鏡保護システムで構成される。ハードウェア的には、ステーションの全望遠鏡を管理するホスト部と望遠鏡それぞれに内蔵されるローカル部、観測環境をモニタするモニタ部に分かれる。本論ではシステムで分類してそれぞれの装置を説明する。

CRAFFT のフェーズ 1 では望遠鏡は 4 台を 1 ステーションとして運用するが、今後開発を進めることで、最終的には 1 ステーションで全方位角をカバーするように望遠鏡を配置すると考えられるため、1 ステーションあたりの望遠鏡の数は 1 台の視野角を  $8^\circ$  とすると 45 台必要になる。また、現在の望遠鏡の光検出面は宇宙線の検出ができる段階にあるが、観測に向けて最適化されたものではない。これも現在最適化に向けて設計中であるため、光検出面を担う光電子増倍管とそれに付随するローカル部分には変更が加わることが予想される。今回のシステムはフェーズ 1 に向けて、望遠鏡 1 台に対して光電子増倍管 1 本、1 ステーションに対して望遠鏡 4 台分を考慮した設計となっている。

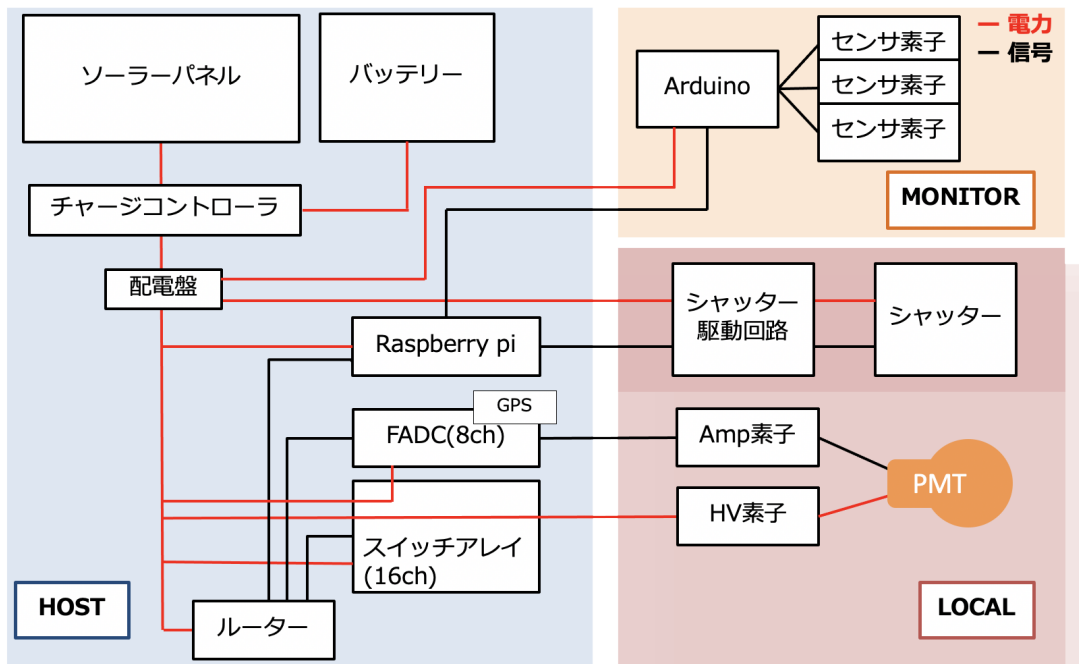


図 3.1 完全自律観測システムのシステム図

## 3.2 自律観測システム

宇宙線観測望遠鏡をオペレーターなしでスタンドアロン運用するためには観測時間の管理と、それに合わせた望遠鏡の各モジュールの制御が必要となる。例えば光電子増倍管への高電圧の印加やシャッターの開閉を自律観測システムで管理、制御する必要がある。まず本システム全体の構成をハードウェアごとに説明する。

ホスト部は給電システム、コントロールコンピュータ、FADC、リレーモジュール、ルーターから構成され、望遠鏡ステーションに1組実装される。コントロールコンピュータが観測のスケジュールと全体のコントロールを司り、ルーターを経由して各装置を制御する、これに対してFADCは光電子増倍管からの信号を処理して保存する役割を持つ。

ローカル部は各望遠鏡に1組ずつ配置される。ただし光電子増倍管で構成される望遠鏡感面は今後拡張される予定があるため、図のPMT部分はこの通りではない。各望遠鏡には検出用の感面を構成する光電子増倍管と望遠鏡を保護するシャッター部分で構成され、それぞれホスト部のリレーモジュールとコントロールコンピュータで制御される。

モニタ部はコントロールコンピュータと接続された専用マイコンで一括で管理され、データ収集を行う。モニタ部の詳細については次章で詳しく説明する。

以降各部の装置について具体的に説明する。

### 3.2.1 コントロールコンピュータ

コントロールコンピュータには RaspberryPi シリーズを使用した。図 3.2 に外観を示す。RaspberryPi は現在までで RaspberryPi4 まで販売されているが、本装置では RaspberryPi2 Model B を採用した。RaspberryPi の各ナンバリングでの性能を表 3.1 で比較する。各ナンバリングの中でも細かく異なるシリーズが存在

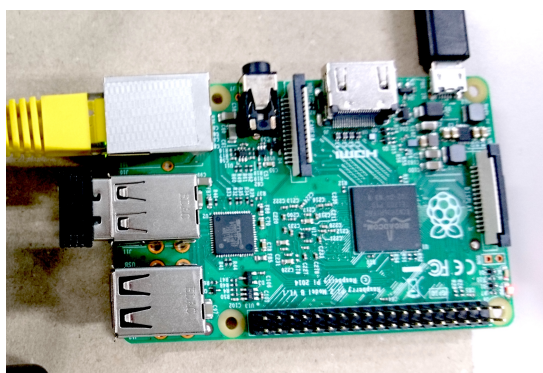


図 3.2 RaspberryPi Model2B の外観

表 3.1 RaspberryPi 比較表

項目	RaspberryPi B+	RaspberryPi2B	RaspberryPi3B	RaspberryPi4
CPU	シングル 700MHz	クアッド 900MHz	クアッド 1.2GHz	クアッド 1.5GHz
メモリ	512MB	1GB	1GB	1~8GB
ネットワーク	○	○	○	○
GPIO	○	○	○	○
消費電力 (典型)	330mA(1.65W)	350mA(1.75W)	400mA(2W)	
電源 (推奨)	1.8A(9.0W)	1.8A(9.0W)	2.5A(12.5W)	3A(15.0W)
価格	\$25	\$35	\$35	\$35~75

するが今回は最も充実した ModelB シリーズの世代ごとの比較を行っている。今回の使用目的が自律システムであるため現状そこまでの高性能を要求しないことと、ソーラーパネルによる給電を行う都合上消費電力は極力低く抑えたいため、今回は RaspberryPi2 ModelB を選択した。また、RaspberryPi ModelB+ でも同様



に動作を確認できたが、稼働試験の際に動作停止を起こしウォッチドッグタイマーにより自動的にシステム再起動する問題が定期的に発生したためより性能の高い RaspberryPi2 ModelB が選定された。

本装置はホスト部に配置され、観測のスケジューリングとそれに合わせた、リレーモジュール、FADC、シャッターモジュール、モニタを制御する役割を担う。具体的な制御ソフトウェアは次項で解説する。

### 3.2.2 FADC

FADC とは高速のアナログデジタル変換回路のことを指す。CRAFFT 望遠鏡の観測ターゲットとなる宇宙線は光速に近い速度で運動するため観測視野内を数百 ns で横切る。そのため 100MHz 程度のサンプリングレートを持つ AD 変換回路が必要となり、そのために FADC を用いた。



図 3.3 特殊電子回路株式会社 高速 ADC&信号処理ボード Cosmo-Z

使用した FADC の外観を図 3.3 に示す。CRAFFT のコストダウンのために市販の FADC 回路である特殊電子回路株式会社の ZYNQ 搭載 ADC ボード、Cosmo-Z を使用した。そのスペックを表 3.2 に示す。本装置はサンプリング速度が 80MHz で 12.5ns ごとに信号波高を記録することができる。これは宇宙線をとらえる上で十分なサンプリングレートであると言える。また、DAQ システムの挙動を field-programmable gate array (FPGA) で記述することができる。本装置は Linux の OS を搭載しており、HDD の接続や LAN によるアクセスが可能であるため、DAQ によって大量のデータを保持する場合や、コントロールコンピューターで統合制御する上で有用である。

Cosmo-Z で宇宙線信号を捉える際にはその信号の取得時間を正確に記録する必

表 3.2 Cosmo-Z の仕様

項目	値
CPU	デュアルコア Cortex-A9 533MHz メインメモリ 1GB
ADC 精度	12bit
ADC チャンネル数	基板 1 枚あたり 8ch 最大で 32ch
サンプリング速度	80MHz
フルスケール	-0.5V~+0.5V
アナログコネクタ	SMA コネクタ
消費電力	7W @8ch 時
使用可能メモリーカード	SD カード/SDHC カード (32GB まで)
通信インタフェース	・ Gigabit Ethernet ・ PCI Express Gen2 ・ USB3.0 ・ USB2.0 (UART)
電源	5V2A 以上

要がある。そこで、信号を検出すると同時に GPS 信号から正確な時間を取得する。Cosmo-Z と GPS アンテナを接続するのに用いる GPS 信号取得基盤とそれを Cosmo-Z に接続した際の写真を図 3.4 に示す。信号の取得には Cosmo-Z の汎用 GPIO コネクタを用いており、電源は Cosmo-Z から供給している。

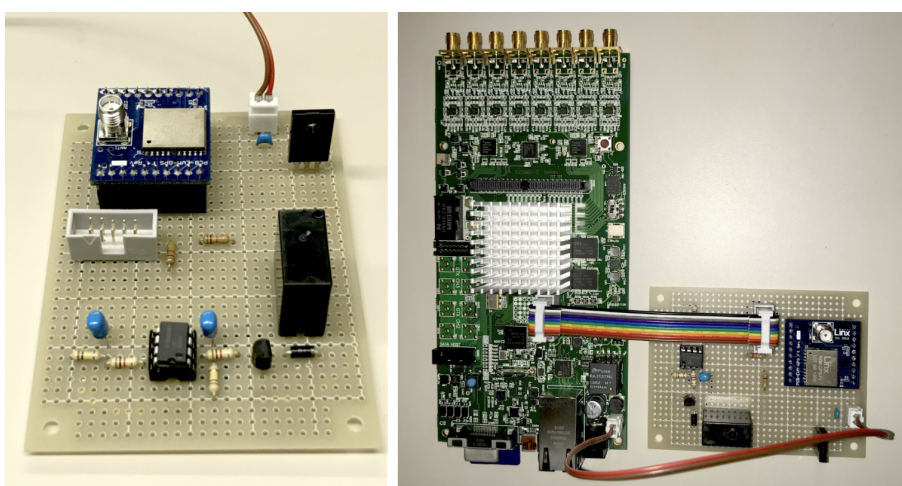


図 3.4 GPS モジュール読取用基盤と CosmoZ に接続した際の写真

## 3.2.3 リレーモジュール

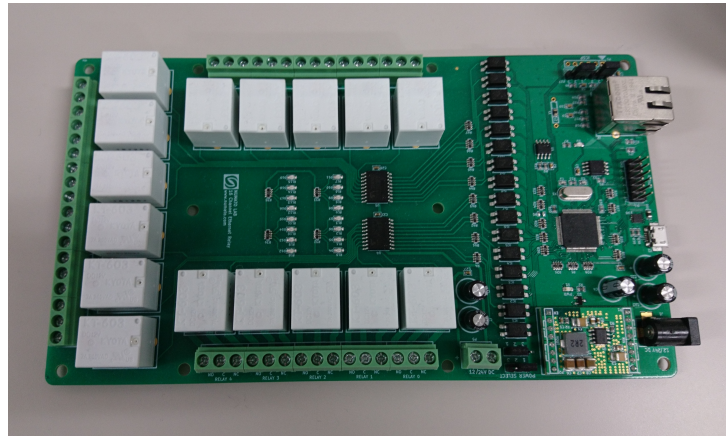


図 3.5 NUMATO LAB 「16Channel Ethernet Relay Module」

表 3.3 リレーモジュールのスペック

項目 (RELAY)	値
リレー ch 数	16ch
電源電圧	12V
最大消費電流	600mA
公称コイル消費電力 (/リレー)	360mW
最大スイッチング電圧	250VAC/30VDC
最大スイッチング電流	15A
最大スイッチング電力	2770VAC/240W
最長スイッチング反応時間 (ON)	10ms
最長スイッチング反応時間 (OFF)	5ms
項目 (ADC)	値
GPIO 数	8
ADC 分解能	10bits
フルスケールレンジ	0-VDD
参照電圧	VDD
アナログ電圧源の推奨インピーダンス	2.5k $\Omega$

PMT や Cosmo-Z は観測中に電力を消費するが、観測時間外は電力を供給し続ける必要はない。したがって電力消費量を抑えるために、CRAFTT の完全自律運用では電力の管理が必須項目となる。そのために、Cosmo-Z と各 PMT への電

力供給を管理するリレーモジュールを導入した。使用したリレーモジュールの外観を図 3.5 に示す。使用したのは NUMATO LAB の 16Channel Ethernet Relay Module である。本製品はネットワーク経由で 16ch のリレーを個別にスイッチングできる特徴があり，コントロールコンピューターからネットワーク経由で各装置をコントロールする本システムに適している。リレーモジュールのスペック表を表 3.3 に示す。

また，本リレーは AD コンバーターを搭載している。これは後述の電力供給システムからの供給電圧と光電子増倍管への印加高電圧値をモニタするのに用いられている。

### 3.2.4 ルーター

RaspberryPi から Cosmo-Z，リレーモジュールを駆動するためにこれらを同一のローカルネットワーク上に配置する必要がある。そのために低消費電力のルーターを用意した。今回使用したルーターの外観を図 3.6 に示す。今回の試験ではルーター以下の ip アドレスを表 3.7 に示す値に設定した。



図 3.6 自律観測試験に使用したルーター

図 3.7 設定した IP アドレス

装置	IP アドレス
ルーター	192.168.100.1
Cosmo-Z	192.168.100.219
リレーモジュール	192.168.100.217
RaspberryPi	192.168.100.200

### 3.2.5 光電子増倍管

宇宙線空気シャワーによる大気蛍光は非常に微弱な光であり，検出には極めて高感度な光検出器が必要になる。そこで CRAFFT 望遠鏡でも光電子増倍管を用いて宇宙線観測を行う。現在の感面最適化の開発から，今後の開発でより小型の光電

子増倍管が使われる予定となっているため、口径の近い浜松ホトニクス製の R6234 を用いた。使用した光電子増倍管を図 3.8 に示す。

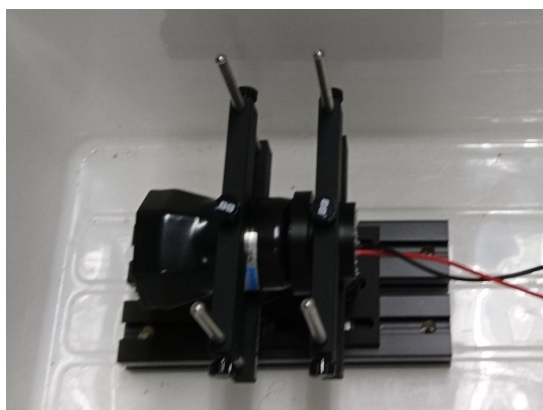


図 3.8 自律観測試験で用いた光電子増倍管 R6234

### 3.2.6 ローカル基盤

PMT は 1000V 程度の高電圧を必要とする光検出素子であるため、対応する電圧を出力できる回路基盤が必要となる。また、光量にもよるが得られる信号は極めて小さいため入力信号を増幅しなければならない。これらを実現するための回路基

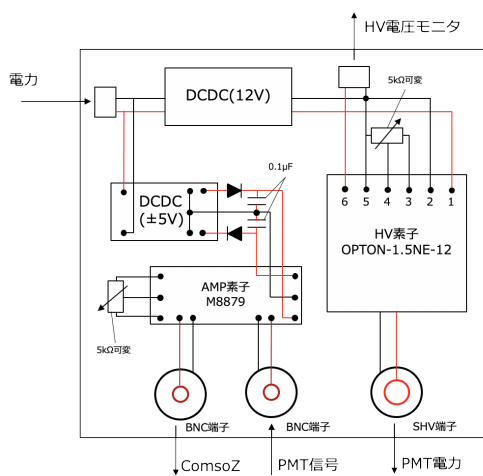


図 3.9 PMT への電源供給と信号増幅のためのローカル基盤

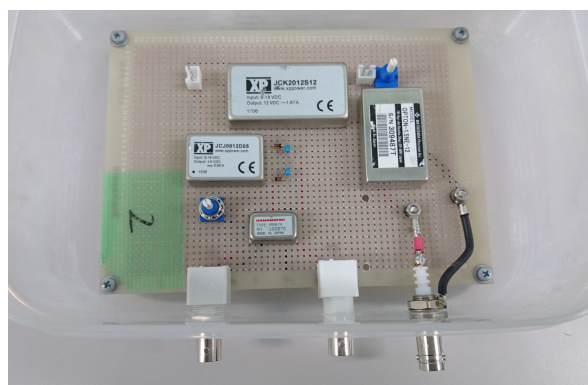


図 3.10 用意したローカル基盤の写真

盤を用意した。作成した回路の回路図を図 3.9 に、写真を図 3.10 示す。PMT 印加電圧を作成する HV 素子として松定プレシジョン製の OPTON-1.5NE-12 と、信号増幅用として浜松ホトニクス製のアンプ素子 M8879 を使用した。また、HV 素子とアンプ素子は印加電圧とアンプ倍率をコントロールするための  $5\text{k}\ \Omega$  の可変抵抗を備えてある。

HV 電圧モニタは HV 素子の作成する高電圧の電圧値をモニタするための端子で、AD コンバータに接続することで電圧値をリアルタイムにモニタすることができる。本システムではリレーモジュール搭載の AD コンバータで電圧値を読み取る。

### 3.3 望遠鏡保護システム

CRAFFT 望遠鏡は日中、夜間問わず観測サイトに設置されるため、日中は集光用の大型フレネルレンズによる太陽光の集光に対応する必要がある。そこでフレネルレンズ面と望遠鏡を太陽光から保護するためのシャッターシステムが必要となった。

#### 3.3.1 保護用シャッター

望遠鏡保護システムとして以下の3つの案を検討した。

1つ目は望遠鏡内部にハンドメイドのシャッター機構を搭載する案である。設置のイメージを図3.11に示す。この機構は最も安く作れるが既製品ほどの信頼性を得られないこと、小型に作ろうとした場合にレンズの集光作用にシャッター面が耐えられない可能性があることなどの問題がある。太陽光の集光サイズごとの

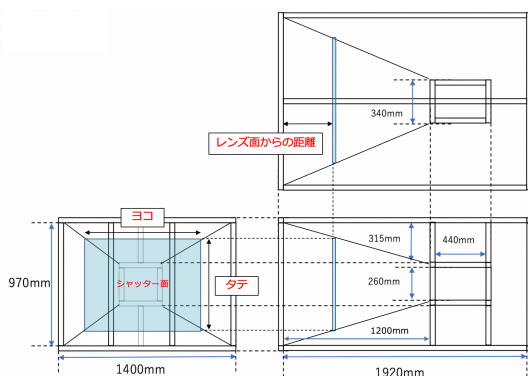


図 3.11 ハンドメイドのシャッター案

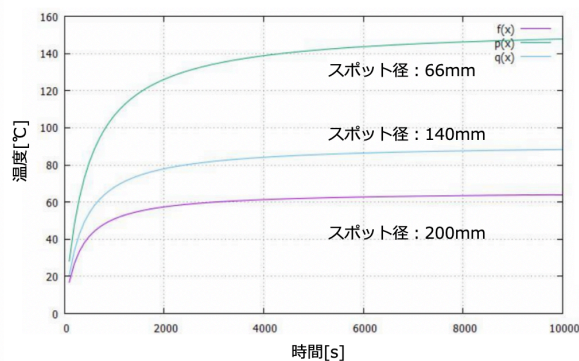


図 3.12 シャッター面での発熱温度の見積もり

表 3.4 焦点面からの距離に対する質量

レンズ面からの距離	シャッター面でのスポット直径	ヨコ	タテ	質量
1124.6mm	66mm <sup>2</sup>	512.8mm	384.6mm	532.6g
1040.0mm	140mm <sup>2</sup>	579.6mm	434.7mm	680.2g
971.4mm	200mm <sup>2</sup>	633.7mm	475.2mm	813.1g

シャッター面での気温からの上昇温度を見積もったグラフを図3.12に示す。アル

ミは 150 度付近から歪みや変形が生じる可能性がある。また、グラフの各スポットサイズに対応するレンズ面からの距離とアルミ板シャッター面の重さを表 3.4 に示す。

2 つ目は望遠鏡内部に電動シャッターを搭載する案である。選定したのはセイキ社製の「ハニカムサーモスクリーン」という製品である。検討したシャッターの写真を図 3.13 に、シャッター面の断面図を図 3.14 に示す。本シャッターは特徴として断熱性に優れること、そもそも天窓用の製品であるため斜めや横向きで設置できる保証がある点が挙げられる。図 3.14 で示されるように内部が中空でアルミシートが貼り付けられた構造のシャッター面のため外部からの光だけでなく熱も遮断する。この特徴は内部に PMT やそれに付随するエレキを封入する予定の CRAFFT には適している。また、シャッター装置そのものを CRAFFT の外装で保護することで経年劣化を抑える効果も期待できる。



図 3.13 セイキ社製 ハニカムサーモスクリーン

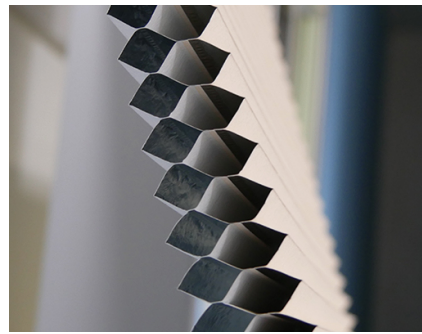


図 3.14 ハニカムサーモスクリーン 断面図

3 つ目は望遠鏡外部に金属製の電動シャッターを搭載する案である。対応する製品として三和シャッター社製の「マドモアスクリーン S」を選定した。外観を図 3.15 に示す。本シャッターはバッテリーとソーラーパネルを搭載した自律型で、電動で動く製品である。ソーラーパネルとバッテリーはシャッター駆動用の緊急電力としての利用が期待できる。また、バッテリー駆動であることから本シャッターは直流電源で駆動させることができ、バッテリーによる直流駆動の本システムに組み込みやすい特徴もある。外部シャッターとしての利点はレンズ面が保護できる点にある。風が強い日などは砂塵や飛石でレンズ面が傷つけられる恐れがあるが、外部シャッターはこの影響を最小限に抑えることができる。特に現在試験が予定されるユタ州は乾燥地帯であるため、大きな効果が期待できる。また、CRAFFT に用い





図 3.15 三和シャッター社製 マドモアスクリーン S ソーラータイプ

られるフレネルレンズは素材がPMMAというアクリル樹脂であり、この素材は紫外線に弱いという特徴がある。CRAFTTで用いられるフレネルレンズ素材の紫外線や砂塵による影響を見積もったグラフを図3.16に示す。時間経過によって透過

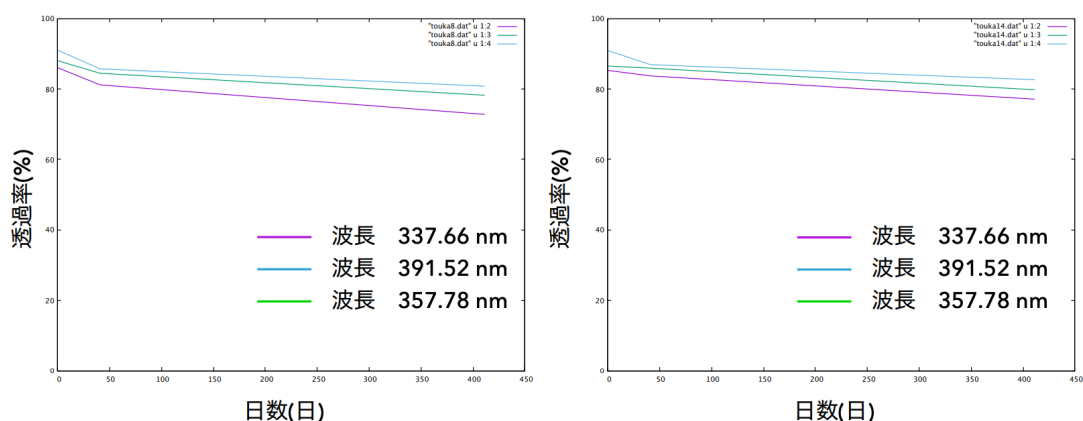


図 3.16 日数毎の透過率 (何もしていない場合 (左) と洗浄した場合 (右))

率が低下していることが確認できる。レンズ前にシャッターを設置すれば日中の太陽光による紫外線の影響を抑えられる。

これらの案を検討した結果、紫外線や砂塵などのレンズ面への影響を考慮してシャッターをレンズ面の外側に設置する3つ目の案を採用した。最終的に選定したマドモアスクリーンを試験機に導入した際の外観を図3.17に示す。また、これに合わせて図3.18に示すように望遠鏡を改装した。赤いフレーム部分が新規にフレームの差し替え、追加を行なった部分となる。

次に、本シャッターは通常とは違い CRAFTT 望遠鏡の仰角に合わせてシャッ

ター面が傾斜して使用される予定となる．そこでシャッターの連続開閉による耐久試験を行った．図 3.19, 図 3.20 に試験の様子と得られたデータを示す．1113,1114 は傾斜あり 1115,1116 は水平の場合のシャッター開閉機の温度変化を示したものである．20 往復繰り返し開閉を行なった試験の結果から斜めの場合に特に上昇温度が大きくなるような現象は見られず，斜め設置の場合でも問題なく使用できるといことが確認できた．



図 3.17 シャッターを取り付けた CRAFT の写真

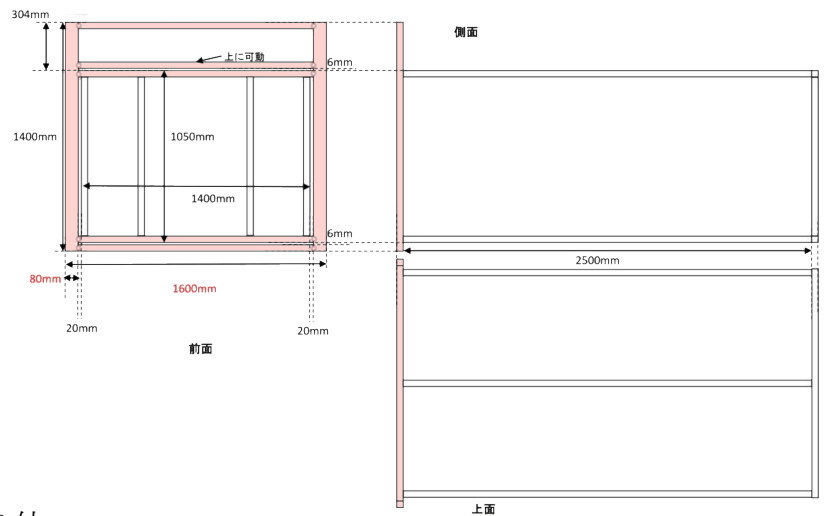


図 3.18 シャッター取り付け用に改造した CRAFT の設計図

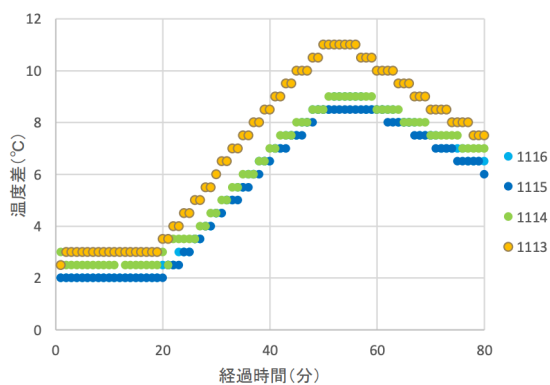


図 3.19 斜めに動作させたシャッターの影響を見積もったグラフ



図 3.20 試験の際の様子

### 3.3.2 シャッター制御回路

本シャッターは観測システムに合わせて開閉を制御する必要があるため、自動で電氣的に制御できるようにシステムに改良を施した。シャッターに内蔵してあるシャッター開閉用の開閉機にアクセスすることで電力供給と開閉コントロールができる。図 3.21 に実際に構築したシャッター制御回路の回路図とその写真を示す。

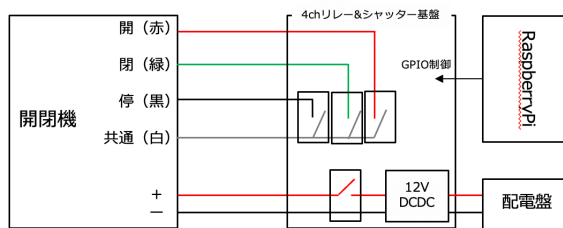


図 3.21 シャッター制御回路回路図

図 3.22 シャッター制御用回路写真

また、本シャッターの制御に SODIAL(R)4ch5V リレーモジュールを使用した。このリレーは RaspberryPi の GPIO で制御することができ、接点側は DC30V, 10A まで使用できる。先述のリレーモジュールとは独立したリレーを使用することで同時に故障するリスクを低減できると考えられる。

### 3.4 電力自給システム

特に僻地で望遠鏡を自律運用するためには、PMT や観測システムに電力を供給するために、一般の電力供給網に頼らない独立した給電システムが必要になる。CRAFTT 望遠鏡ではソーラーパネルとバッテリーを用いて給電系を構成した。使用したのはオータムテクノロジーの AT-MA200C の単結晶ソーラーパネル、ACDelco の M31MF マリン用メンテナンスフリーバッテリー、EPever の Tracer-BN 40A タイプの MPPT ソーラーチャージコントローラーである。それぞれの外観を図 3.23 に示す。また、それぞれのスペックを表 3.5 にまとめた。



図 3.23 左から AT-MA200C ソーラーパネル，M31MF バッテリー，Tracer-BN 40A チャージコントローラー

各装置の接続図と接続した写真を図 3.24，図 3.25 に示す。

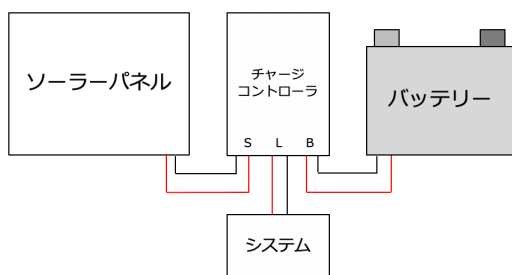


図 3.24 給電システムシステム図

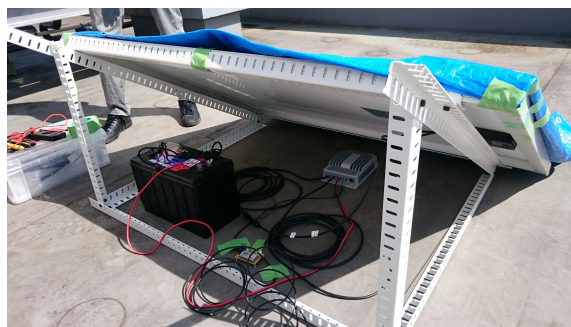


図 3.25 電力自給システムを接続した際の写真

表 3.5 電力自給システム各装置のスペック

ソーラーパネル AT-MA200C	
セル種類	単結晶
公称最大出力	200W
公称最大出力動作電圧	35.5V
公称最大出力動作電流	5.63A
公称開放電圧	42.6V
公称短絡電流	6.08A
外径寸法	992x1324x40mm
質量	15.20Kg
ケーブル	約 90cm MC4 コネクタ付
バッテリー M31MF	
CCA 値	625CCA (-18 度での瞬発力)
MCA 値	900MCA(-1.1 度での瞬発力)
サイズ	高さ : 237mm 長さ : 330mm 幅 : 173mm
重量	26.5kg
容量	115Ah (Ah20Hr 率)
定格電圧	12V
ソーラーチャージコントローラー Tracer-BN 40A	
常用システム電圧	12V/24V 自動
定格バッテリー電流	40A
定格負荷電流	20A
最大 PV 開回路電圧	150V
最大バッテリー電圧	32V
最大 PV 入力電力	520W/1040W
自己消費	≦ 50mA (12V) / ≦ 27mA (24V)
通信ポート	RS485/RJ45
機密	IP30
動作温度	-25 度~55 度

### 3.4.1 電力消費量と給電能力の比較

ソーラーパネルによる電力供給能力は、1日の日照時間を現在の観測サイトであるアメリカ合衆国ユタ州で晴れた日の最短となる8時間とすると1600Whとなる。天候などを含めた月ごとの平均の日照時間では12月に4.35時間程度となるため、870Whとなる。これに対してバッテリーの充電容量は1380Whで、晴れていれば

充電が全くない状態から十分に充電可能，平均日照時間ならば2日で満充電状態にできる．消費量はシャッターの動作を除くと，観測時間を最長の15時間として計算した場合に，測定値ならば約326Wh，最大定格であれば約521Whとなる．これは電源供給能力を十分に上回り，電源供給がなかったとしても満充電状態なら2日の観測に耐えうることがわかる．シャッターの消費電力は計測したところ9Wで，1度の動作は30秒で完了するため，1往復に必要な電源容量は0.15Whとなる．バッテリーの充電量を鑑みると，観測の中断，再開などでシャッターの開閉をしたとしても，1日あたり10回以上繰り返しても問題ないと言える．

表 3.6 電力供給能力と各装置の消費電力

給電システム	
ソーラー給電	200W
最大電圧	35.5V
最大電流	5.63A
バッテリー容量	115Ah (Ah20Hr 率)
自動観測システム+望遠鏡保護システム	
RaspberryPi	1.3~9W
Cosmo-Z	8W
リレーモジュール	1.1~7.2W
ルーター	1.3W
光電子増倍管	1W
シャッター	9W (動作時)
	待機状態 (測定) : 4W
	観測中 (測定) : 13.5W
	最大定格 : 26.5W
モニタシステム	
湿度センサ	0.0025W
輝度センサ	0.002W
感雨センサ	3.6W 以下
風速センサ	?W
WXT ウェザーモニタ	0.036W
	合計 : 3.6405W

### 3.5 完全自律観測システムのソフトウェア構成

ホスト部のコントロールコンピュータは観測のスケジュール，全望遠鏡の観測活動の管理を行う本システムの基幹部分である．観測スケジュールは RaspberryPi の機能である CRON を用いた．図 3.26 に RaspberryPi の CRON にスケジュールされた内容を示す．システムは世界標準時（UTC）で表記される．大まかに

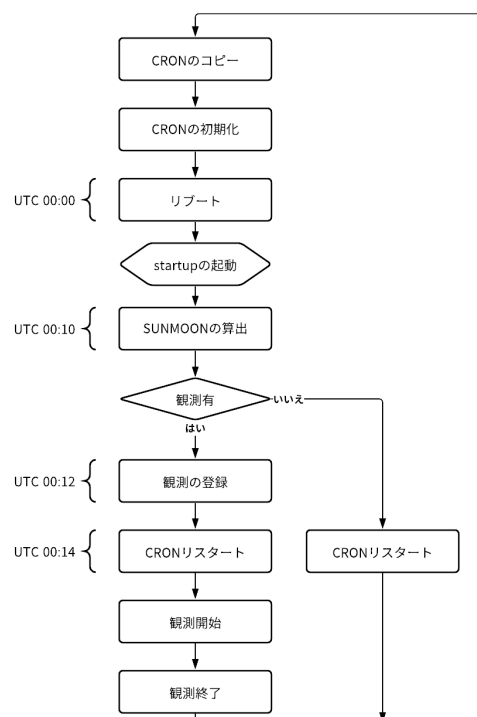


図 3.26 完全自律観測システムのソフトウェアフローチャート

CRON の初期化，レポート，観測時間のスケジューリング，観測を 1 日のスケジュールとしてこの流れを繰り返す．CRON の初期化は前日の観測時間の登録を削除し新しい観測時間を書き込む準備として行う．レポートは定期的にシステムを初期化してエラーなどで未処理のタスクが積まれることを防ぐ．観測時間のスケジュールと観測は，後述する日の出・日の入と月の出・月の入を算出するサンムーンプログラムによって得られた時刻を CRON に登録することで実行される．観測可否はサンムーンプログラムによって得られたその日の観測時間が 1 時間を下回るかどうかで決定する．現在は当面の観測地として考えられるアメリカ合衆国ユタ州において季節によらず観測時間外である UTC 0 時 0 分にシステムをレポート

し、アメリカ合衆国ユタ州の座標に合わせたサンムーンプログラムによって観測のスケジューリングを行っている。次ページに本ソフトウェアに実装されたソフトウェア群の全体図と各ソフトウェアの説明を示す。

RaspberryPi に実装された各ソフトウェアの説明

```

config.sh ————— ディレクトリ構造を書き記した設定ファイル
cron.conf ————— CRON の初期状態
set_cron.sh ————— CRON を初期化
monitor/ ————— 各種モニタリングシステム
  startup.sh ——— システム起動時のスタートアップ
  monitor.sh ——— モニタの起動
work/
  env_read.py — 簡易モニタの起動
  hv_moni.sh — HV 印加電圧と電源電圧のモニタの起動
  wxt/ ————— WXT ウェザーモニタの起動
data/ ————— モニタによって得られたデータ群（日付ごと）
  hv/ ————— HV, 電源電圧
  env/ ————— 簡易モニタ
  cpu/ ————— CPU 温度
  weather/ ——— WXT ウェザーモニタ
src/
  crafft_obs.sh — 観測開始と終了の一連のプロセスを実行する
  daq.sh ————— Cosmo-Z に格納された DAQ プログラムを実行する
  relay.sh ————— リレーモジュールのリレーをコントロールする
  shutter.py ——— シャッターの開閉をコントロールする
  timeset.sh ——— 観測時間を CRON に登録する
  sunmoon/ ——— 観測時間を算出する

```

monitor ディレクトリは主に環境モニタリングシステムが格納されたディレクトリで、data ディレクトリは環境モニタリングシステムによって得られた環境データが格納されているディレクトリであるため具体的な説明は次章で行う。src ディレクトリに観測システム部分が格納される。sunmoon ディレクトリ下の python スクリプトが観測時間を算出するサンムーンプログラムで、それを用いて timeset.sh によって CRON に観測時間が設定される。具体的に設定されるのは

```
$crafft_obs.sh start
```



```
$craft_obs.sh end
```

となっている。それぞれ実際に実行される内容は次となっている。

```
$craft_obs.sh start
```

```
$Cosmo-Z on
```

```
$HV on
```

```
$sleep 1800
```

```
$daq start
```

```
$shutter open
```

```
$craft_obs.sh end
```

```
$shutter close
```

```
$daq end
```

```
$sleep 300
```

```
$HV off
```

```
$ Cosmo-Z off
```

開始時に 1800s の遅延が入るのは光電子増倍管に信号を入れてから出力信号が落ち着くまで十分に待つためである。また、このために観測時間の登録で設定される \$craft\_obs.sh の実行はサンムーンによって算出された適切な観測時間より 30 分早く設定されている。

## 第4章

# 新型望遠鏡の環境モニタリングシステム

新型望遠鏡を広範囲に展開し、完全自律観測システムによって独立して動作する上で、観測データや観測活動の最適化のために、テレスコープアレイ実験の大気蛍光望遠鏡と同様に観測環境を監視する必要がある。例えば風が強い場合はレンズ面の保護やシャッター装置の保護のために観測を中止しなければならない。このために環境をモニタする装置を新型望遠鏡に導入した。

### 4.1 WXT ウェザートランスミッタ

観測環境をモニタするためにテレスコープアレイ実験で用いられている環境モニタシステムである VAISALA 社の WXT530 シリーズウェザートランスミッターと同じ装置を CRAFFT の試験機に導入した。外観を図 4.1 に示す。

選定した型番は WXT536B1B2A3C1D1B で、データは RS-232 端子を通してシリアル通信で RaspberryPi に送られる。RS-232 端子を RaspberryPi に接続した様子を図 4.2 に示す。本装置は風速、風向、気圧、気温、相対湿度、雨量、降雹を記録できるモジュールで風速、雨量に関してはテレスコープアレイ実験の宇宙線観測でも観測の可否に用いられるパラメーターとなっている。具体的にモニタできるデータとそれぞれに対するスペックを表 4.1 にまとめた。また、このモニタを用いて取得できたデータを図 4.3 に示す。CRAFFT 望遠鏡試験機にはこれ以外に簡易モニタを導入した。その評価用としてこの WXT ウェザーモニタの値を真として用いる。



図 4.1 CRAFFT 試験機に実装された WXT ウェザートランスミッタ

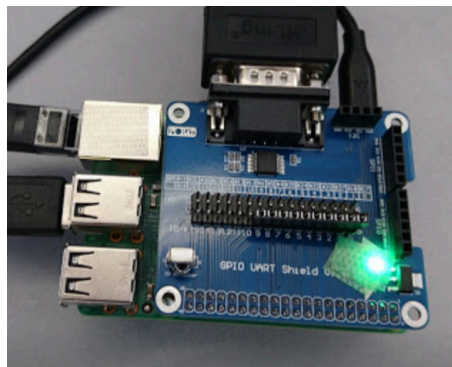


図 4.2 WXT との通信用 RaspberryPi シールド

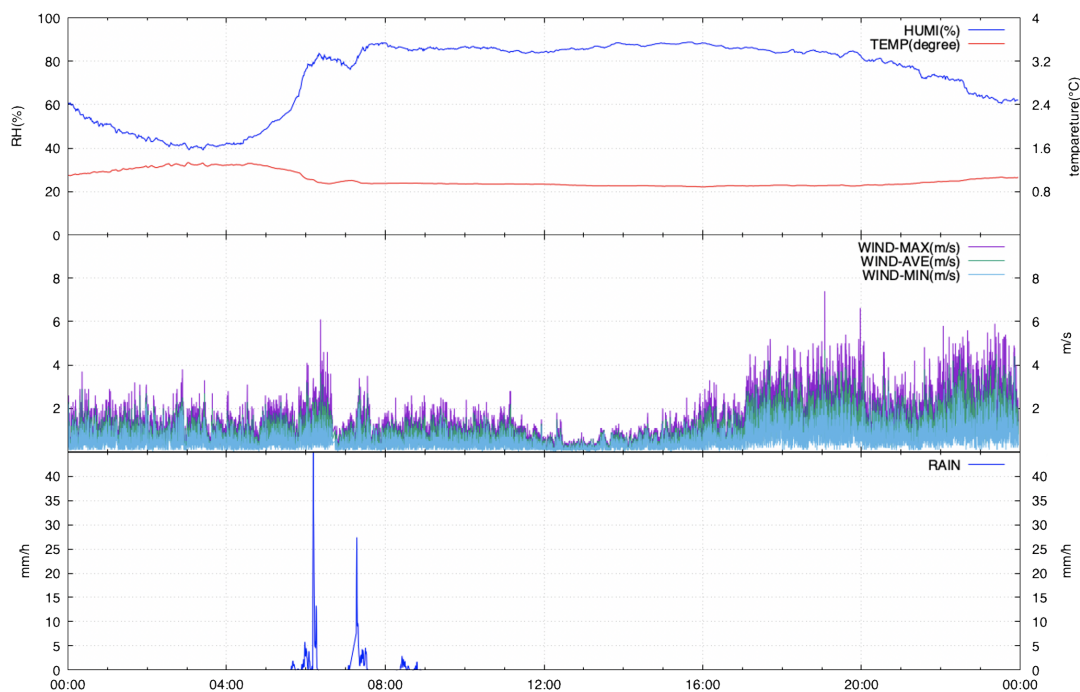


図 4.3 WXT ウェザーモニタで得られたデータ

表 4.1 WXT ウェザーモニタのスペック

- 風速	
範囲	0~60m/s
応答時間	0.25s
精度	± 3% (10m/s)
出力分解能	0.1m/s
- 気圧	
範囲	600~1100hPa
精度 (センサ素子)	± 0.5hPa ( 0 ~ +30 °C ) ± 1hPa ( -52 ~ +60 °C )
出力の分解能	0.1hPa, 10Pa, 0.001bar, 0.1mmHg, 0.01inHg
- 気温	
範囲	-52 ~ +60 °C
精度 (センサ素子 +20 °C)	± 3%RH (0~90%RH) ± 5%RH (90~100%RH)
出力分解能	0.1%RH
- 湿度	
範囲	0 ~ 100%RH
精度 (センサ素子)	± 0.3 °C
出力分解能	0.1 °C
- 降雨	
収集面積	60cm <sup>2</sup>
出力分解能	0.01mm
長時間の精度	5% 以内 (ただし天候による)
降雨時間, 分解能	10 秒
降雨強度, 範囲	0 ~ 100%RH
- 降雹	

## 4.2 簡易モニタ

CRAFFTは大規模展開のリスクを低減するために望遠鏡単体の価格をできるだけ安価に抑える必要がある。そこで現行の大気蛍光望遠鏡で用いられる環境モニタリング装置よりもより安価に作成できる環境モニタリングシステムを開発した。これは、ArduinoとArduinoでデータ取得できる安価なセンサで自作された簡易モジュールとなっている。試験機に実装した装置の外観を図4.4、図4.5に示す。また、簡易モニタに現在搭載されているセンサとその価格を表4.2にまとめた。環



図 4.4 作成した簡易センサの写真



図 4.5 Arduino との接続の様子

表 4.2 簡易モニタに導入済みのセンサ

項目	センサ	価格
風速	qs-fs01	6,232 円
降雨	ASUZAC AKS-120T	16,500 円
湿度	Honeywell HIH-4030	2,368 円
輝度	Adafruit TSL2591	1,089 円
	合計	26,189 円

境モニタリングシステムはCRAFFTの観測ステーションに1機ずつ配置されると思われるため、モニタ装置のCRAFFT望遠鏡1台に対する単価は、ここに示された価格よりも安くなるはずだが、実運用前にCRAFFT望遠鏡が実地試験を行うにあたって、望遠鏡の数が少ない段階では単価のより安い環境モニタモジュールが必要であると考えられる。

表 4.3 に WXT ウェザートランスミッタと今回作成した簡易モニタの比較を示

す。簡易モニタシステムは WXT システムに対して価格だけでなく、新たなモニタの追加、不要なセンサの削除などの拡張性に優れている。一方で製品としてハウジング、耐久性試験が行われているわけではないので、長期の運用には劣ると考えられる。

表 4.3 WXT ウェザーモニタと簡易モニタの比較表

項目	WXT	Arduino
導入モニタ	風速・風向・気圧・気温 相対湿度・雨量・降雹	風速・湿度・輝度 降水
消費電力	330mA(1.65W)	3.7W 以下
価格	400,000 円	約 30,000 円

各センサについて以下に紹介する。

#### 4.2.1 風速モニタ

観測中に風が異常に強くなるような場合は、飛石や砂塵からのレンズ面の保護と、風によるシャッター開閉への影響を軽減する目的でシャッターを一時的に閉じて観測を中断するなどの措置が必要になる。そこで CRAFTT 望遠鏡では風速を常に監視する風速モニタが必要になると考えられる。そこで簡易の風速モニタとして qs-fs01 を選定した。外観を図 4.6 に、スペックを表 4.7 示す。風速モニタには熱型、ペーン型、風杯型、超音波型などがあるが、本製品は風杯型に当たる。型に



図 4.6 風速モニタ「qs-fs01」外観

図 4.7 風速モニタ「qs-fs01」スペック

項目	値
精度	± 1m/s
計測開始風速	0.2~0.4m/s
計測範囲	0~32.4m/s
供給電圧	7~24VDC
出力信号電圧	0.04~2V
動作温度	-40~80° C

よらず風速センサは10万円程度が相場となるが本製品は6,232円と格安の製品になっている。信号出力は電圧をカウント値で得られるため、以下の式で風速に変換する。

$$V_{out}[V] = \frac{S}{1024} * 5$$

$$W[m/s] = (V_{out}[V] - 0.04) * \frac{32.4}{1.6} * 0.43$$

$$(V_{out} = \text{信号}[V], S = \text{信号}[count], W = \text{風速}[m/s])$$

#### 4.2.2 降水モニタ

宇宙線観測において観測視野内に雲があると正しい宇宙線空気シャワーの形状を得られないため、曇りの日の観測データは使わないことが望ましい。曇りは程度によるが、少なくとも雨が降っている場合は観測を中断した方が良いと考えられる。また、CRAFT望遠鏡は雨によりレンズ面に付着する水滴が観測に対して光学的な作用を及ぼすことも考えられる。そこで観測に関わるモニタとして雨モニタが必要になる。雨モニタには雨量を計測する転倒ます式や重量式の雨量計があるが、今回選定したのは水滴の有無を感知する感知式の雨滴センサ「AKS-120T」である。外観を図4.8に、スペックを表4.9に示す。今回選定したのはテフロン製の製品で耐用年数5年で、セラミックス製の製品を選定すれば価格は49,500円となるが耐用年数は10年になる。

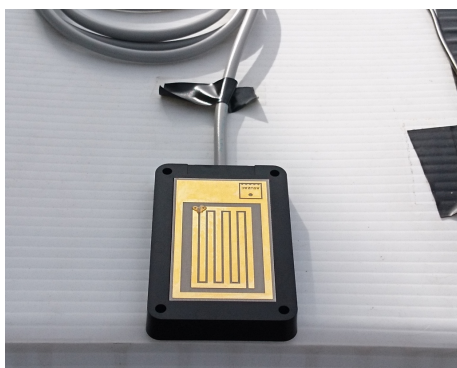


図 4.8 雨滴センサ「AKS-120T」外観

図 4.9 雨滴センサ「AKS-120T」推奨動作条件

項目	値
電源電圧	+9～+24VDC
出力電圧	35V 以下
出力吸込電流	100mA 以下
使用温度範囲	-40～80° C
耐用年数	5 年

### 4.2.3 湿度モニタ

CRAFFT 望遠鏡ではレンズ式の集光器を備えるため、結露などのリスクが考えられる。湿度や気温のデータは結露に直結するため今後の試験での参考のために湿度モニタをインストールした。使用した湿度センサ「HIH-4030」の外観を図 4.10 に示す。また、そのスペックを表 4.11 にまとめた。本製品から得られるのは電圧値であるが、以下の式で湿度に変換することができる。

$$V_{out} = V_{supply} * (0.0062 * (sensorRH) + 0.16) \text{ (typical at } 25^{\circ}\text{C)}$$

$$TrueRH = (SensorRH) / (1.0546 - 0.00216 * T)$$

( $V_{out}$  = 出力電圧 [V],  $V_{supply}$  = 供給電圧 [V],  $sensorRH$  = 検出相対湿度 [%])

( $TrueRH$  = 実際の相対湿度 [%],  $sensorRH$  = 検出相対湿度 [%],  $T$  = 気温 [°C])



図 4.10 湿度センサ「HIH-4030」外観

図 4.11 湿度センサ「HIH-4030」スペック

項目	値
供給電圧	4~5.8VDC
供給電流	200~500 $\mu$ A
精度	$\pm$ 3.5%
セッティング時間	70ms

### 4.2.4 輝度モニタ

CRAFFT の望遠鏡保護システムはサイズ  $1.4m^2$  の集光器から装置を保護する役割があるが、万が一保護システムが稼働しなかった場合にそれを検知するためのフェイルセーフシステムが必要になる。その一環として望遠鏡内部と外部の明るさを常にモニタすることで明るくなってもシャッターが開いているような場合に対応できるシステムが必要になると考えられた。そのための輝度センサを簡易モニタに



導入した。選定したモジュール「Adafruit TSL2591」の外観を図 4.12，スペックを??に示す。本センサは全光，可視光，赤外光を検出でき，SI 単位系での光量も出力する。また，3 段階で感度を調整できる。これらのうちどれを判断のパラメータとして用いるかは今後の試験が必要である。

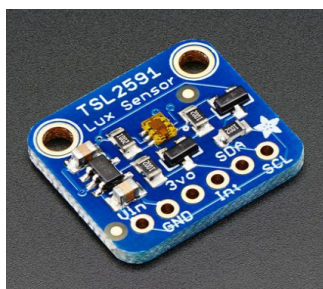


図 4.12 輝度センサ「Adafruit TSL2591」外観

図 4.13 輝度センサ「Adafruit TSL2591」スペック

項目	値
電源電圧	3.3~5VDC
消費電流（通常）	0.4mA
-（パワーダウンモード時）	5 $\mu$ A
インタフェース	I <sup>2</sup> C（アドレス 0x29）
ダイナミックレンジ	600000000:1
測定可能範囲	188 $\mu$ ~88000 Lux
備考	3 段階のレベルシフタ搭載

### 4.3 簡易モニタの評価

実際に得られたデータを図 4.14 に示す。上から簡易モニタの湿度に対する WXT ウェザーモニタの湿度と気温、簡易モニタの輝度、HV 印加電圧とシステム供給電圧モニタ、簡易モニタの感雨系に対する WXT ウェザーモニタの降水強度、簡易モニタの風速に対する WXT ウェザーモニタの風速を横軸時間で 10 月 23 日の 1 日分プロットしたものとなっている。特に風速モニタ、降雨モニタは観測で用いるパラメーターであるため WXT ウェザーモニタと具体的に比較する。

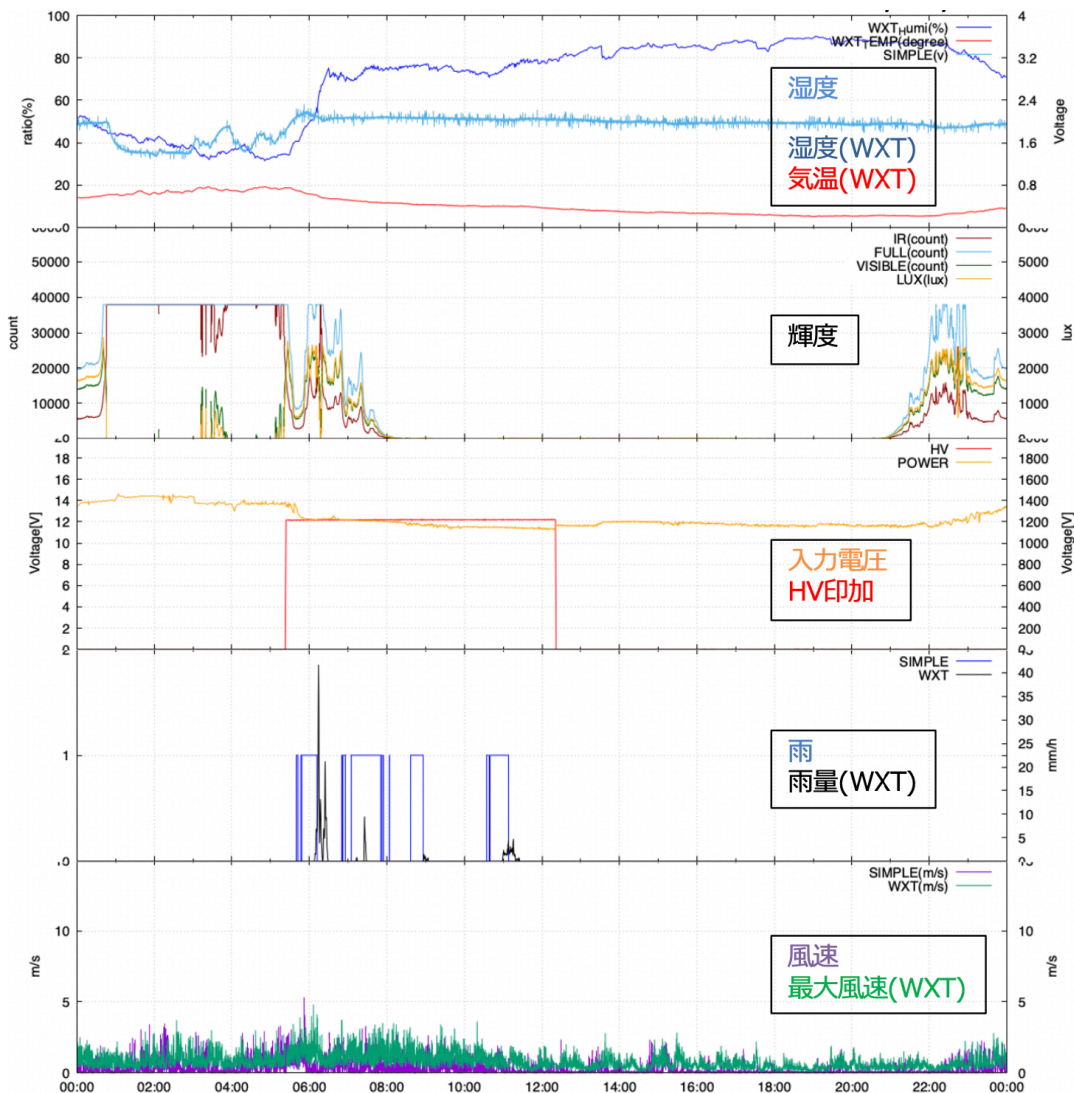


図 4.14 各種モニタによって得られたデータ

### 4.3.1 風速モニタの評価

図 4.15 は、複数日にわたって簡易モニタと WXT の風速値を比較したグラフである。この結果から、大まかにスペクトルは一致しているが、簡易モニタの風速値が常に大きく出力されていることが分かった。これは、ハードウェア的な修正ができる可能性があるが、現状のシステムに一定の倍率で補正をかけることで比較対

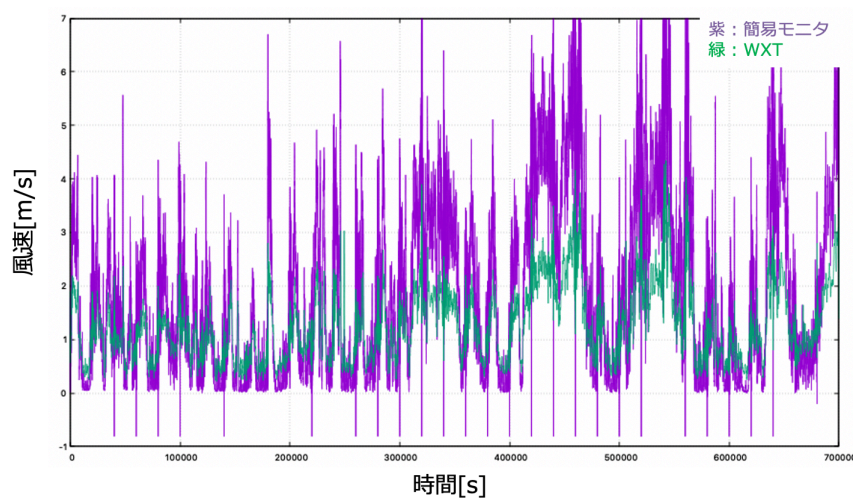


図 4.15 WXT ウェザーモニタと簡易モニタの風速値の比較

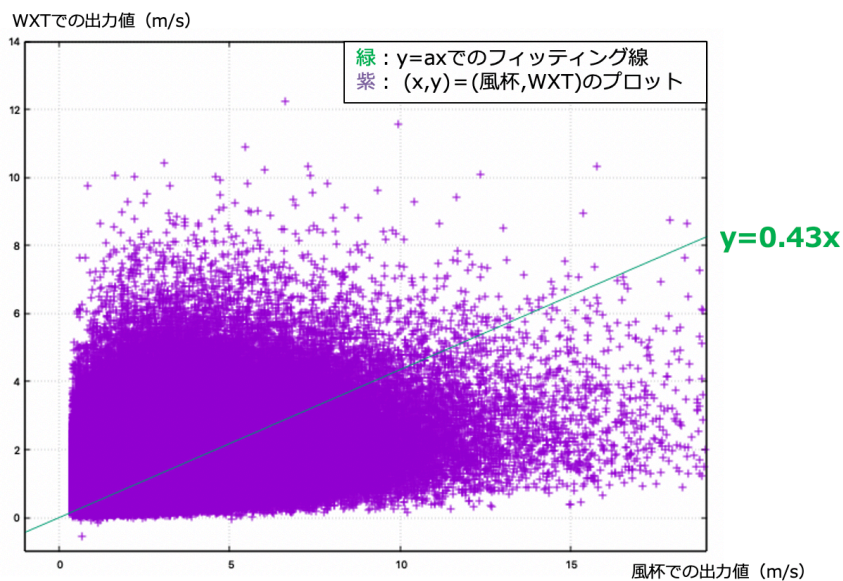


図 4.16 WXT ウェザーモニタと簡易モニタの風速値のスカッタープロット

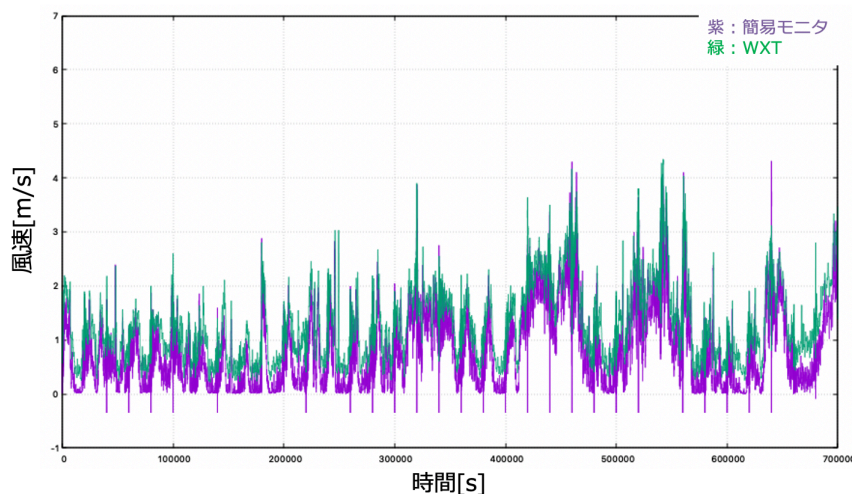


図 4.17 補正をかけた後の WXT ウェザーモニタと簡易モニタの風速値の比較

象の WXT ウェザーモニタの値に近づけることができると考えられたため、これを調べた。図 4.16 は 8 月と 9 月に取得できた全データを用いて、WXT ウェザーモニタで得られた最大風速の値と簡易モニタで得られた風速値をスキャッタープロットにし、 $y=ax$  でフィッティングした結果である、この結果から、簡易モニタで得られた値を 0.43 倍することで真の値として用いることができると分かった。図 4.15 のプロットに対してこの補正をかけた結果のプロットを図 4.17 に示す。簡易モニタの風速データのスペクトルと最大値がおおよそ WXT のデータに一致するようになった。

### 4.3.2 降雨モニタの評価

図 4.18 に WXT ウェザーモニタで得られた 10/01~10/25 までの降水強度と簡易モニタの感雨センサで得られたデータを比較したグラフを示す。WXT が降水強度で得られるのに対し簡易モニタは降水の有無のみを検出するため単純比較はできないが、WXT ウェザーモニタで降水強度が強まっている時に簡易モニタでも雨の検出が確認できる。一方で、WXT でデータが見られない区間にも簡易モニタが反応している場合がある。非常に小雨でも感雨モニタは反応すると考えられるため、WXT の降水強度モニタで検出できない雨を検出している可能性がある。これは WXT で評価できないため、今後、雨を一切検出しない屋内と屋外で比較してこのデータが雨滴によるものなのか切り分ける必要がある。

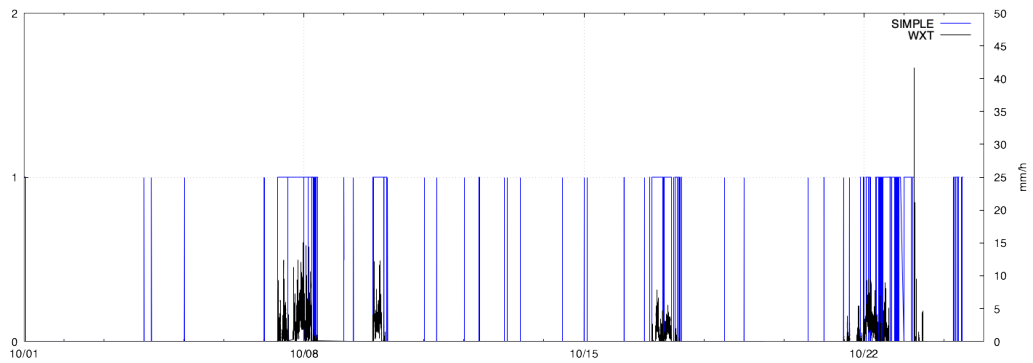


図 4.18 WXT ウェザーモニタと簡易モニタの降雨センサの値の比較

### 4.3.3 輝度モニタの評価

輝度モニタは屋外の太陽光が届く範囲に設置してあるので、日昇、日没の時間とモニタ値の変動を比較して評価した。図 4.19 は 8 月 1 日、2 日と 10 月 23 日、

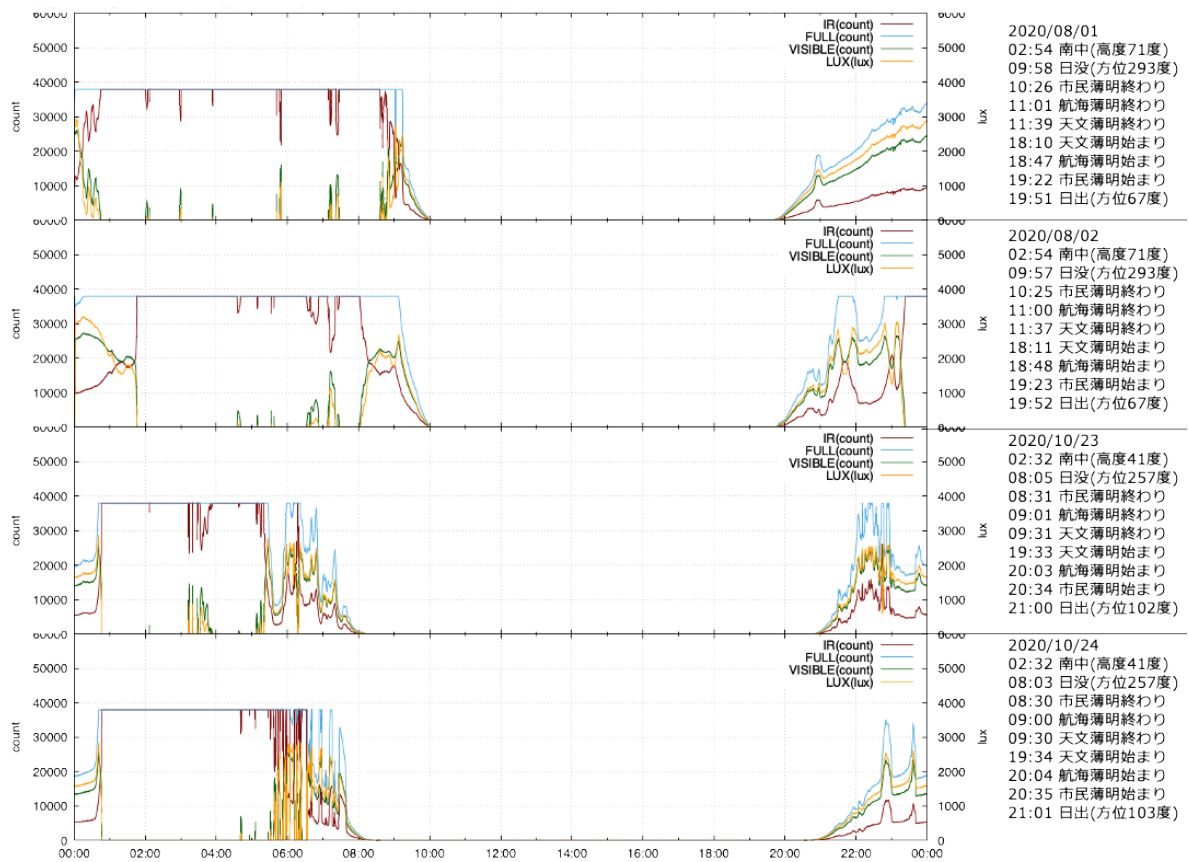


図 4.19 輝度センサと長野市の日昇、日没の比較

24日にかけての輝度モニタの値と、その日の長野市の日昇、日没時間を UTC 時刻で示したデータ [8] である。日昇時間、日没時間は実験場所とほぼ一致する北緯 36.6315 度，東経 138.1883 度，標高 355.3m のデータを用いている。

得られたデータから、輝度センサは該当地点での市民薄明と近い時刻にデータが変化することが確認できた。市民薄明は、太陽中心の高度が地平線または水平線の下 6 度に達するときと日の出または日の入りの間をいう。このとき空は十分に明るく、人工の照明を用いなくても屋外で活動できる程度となる。また、8月と10月での日照時間の変化もこのモニタから確認できた。CRAFFT 望遠鏡のフレネルレンズが直射日光を受けない段階で明るさを検知できるため、フェールセーフなど CRAFFT 望遠鏡のシステムに使用できることがわかった。

#### 4.4 シャッターモニタシステム

自律観測においては、観測環境のモニタの他に観測装置をモニタするシステムも必要になる。特に、大型の集光用レンズを保持する CRAFFT 望遠鏡ではシャッターの状態把握が装置や周辺の保護のために必須となる。そこで、シャッターモニタシステムとして「リミットスイッチ」と「フォトマイクロセンサ」の2種類を検討した。

まずリミットスイッチについて説明する。リミットスイッチとは動作型モジュールの位置や動いたことを検出するための高耐久型スイッチで工場の大型装置などで広く用いられている。CRAFFT 望遠鏡のシャッターの位置検出にこのリミットスイッチを用いる案を検討した。選定したのは Telemecanique Sensors の「スプリングリターンローラーレバー XCKN2145G11」である。外観を図 4.20 に示す。本製品は IP65 の防水防塵性能をもち、機械的寿命は最小で 10000000 回のリミットスイッチとなっている。寸法が 30x42.3x157mm と CRAFFT 望遠鏡のシャッター部分の構造を考えるとやや設置場所に制約があるがリミットスイッチとしては比較的小型の製品であるため設置を検討した。

次にフォトマイクロセンサについて説明する。フォトマイクロセンサとは光を使って物体の位置検出をする素子である。該当するセンサとしてオムロンの「EE-SX952-C1J-R 0.3M」を選定した。図 4.21 に選定した商品の外観を示す。本センサは 13.4 × 14.3 × 11.7mm と非常に小型で取り回しがよいセンサで、0.36W 以下の消費電力で稼働する。状態検出に 940nm の赤色発光ダイオードを使用しているため、光学系である望遠鏡レンズ面付近に設置することで影響が考えられるが、CRAFFT 望遠鏡は背景ノイズを減らす目的で紫外光透過フィルタを用いてい



図 4.20 リミットスイッチ「スプリングリターンローラーレバー XCKN2145G11」

るため影響は少ないと考えられる。

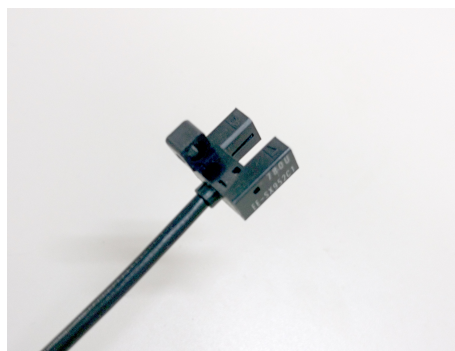


図 4.21 フォトマイクロセンサ「EE-SX952-C1J-R 0.3M」

## 4.5 ソフトウェア構成

データの取得は3章5節で紹介したソフトウェア群のうち~/monitor/work/ディレクトリのソフトウェアを用いる。現状3つの系統として、

1. WXT ウェザーモニタから RS-232 接続端子を用いてシリアル通信経由でデータ取得する
2. Arduino から USBtypeBtoA ケーブルを用いてデータ取得する
3. リレーモジュールの ADC を用いてネットワーク経由でデータ取得する

3種類のソフトウェアが存在し、それぞれ WXT ウェザーモニタのデータ、簡易モニタのデータ、HV 印加電圧とシステムへの供給電圧のデータを取得する。

取得されたデータは `~/data/` ディレクトリ下の各ディレクトリ中に、月ごとにディレクトリ分けし、日付ごとにファイル分けして格納している。これら日付ごとのディレクトリとファイルは起動時のスタートアップスクリプトで生成される。また、このスタートアップで `~/monitor/monitor.sh` が実行されることで全てのモニタが起動、データ収集を開始するようになっている。



## 第5章

# 完全自律運用試験

CRAFFT 望遠鏡における完全自律観測システムと環境モニタリングシステムが確立した。そこで本システムが長期に運用可能であるか、まずは日本で試験を行った。運用可能であれば2021年度を目処にアメリカ合衆国ユタ州にあるTA実験の観測サイトに設置してあるCRAFFT望遠鏡に導入して現地への適応とさらに長期の運用試験を目指す。

### 5.1 試験での装置構成

試験の様子を図5.1に、試験での装置構成を図5.2に示す。場所は信州大学情報工学科棟(W1棟)の屋上で、2020年3月10日から開始した。また、WXTウェザーモニタは6月30日に、簡易モニタは7月28日に装置にインストールした。この試験ではこれまでのCRAFFT望遠鏡の試験で使われてきた光電子増倍管R5912ではなく、R6234というより小型の光電子増倍管を用いている。将来的にCRAFFT望遠鏡は光検出面を最適化する予定があり、それに応じて光電子増倍管のサイズがより小さくなるためそのセッティングに合わしてある。

この試験では給電システムをクーラーボックスに、それ以外のエレキをプラスチックケースに格納して接続した。これらは最終的なエレキハウジングではなく、今回の試験に合わせて簡易的に全装置を防水したものとなっている。また、簡易モニタは観測システムのエレキハウジングとは別に小型のボックスに格納した。簡易モニタに付随する風速センサと感雨センサは外気に晒して設置、湿度センサと光センサは素子型のセンサであるためボックス内に配置してある。風速センサの近傍にWXTウェザーモニタを設置して評価用のモニタリングデータを取得している。



図 5.1 信州大学屋上で試験した際の写真

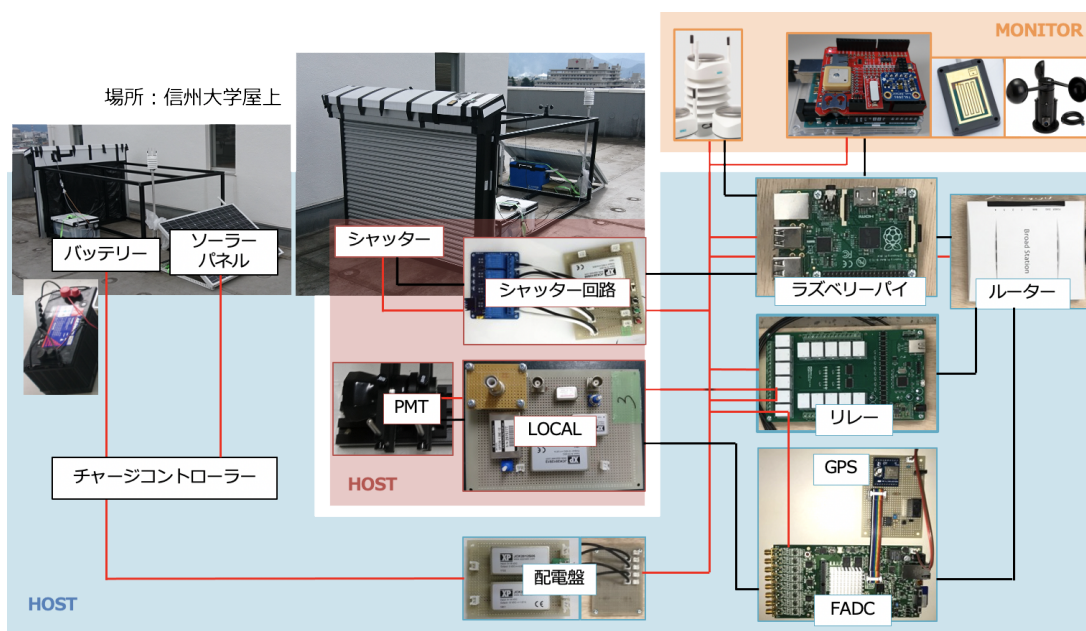


図 5.2 信州大学屋上で試験した際の装置構成

## 5.2 試験結果

試験で実際に動作するのは、光電子増倍管、シャッター、各種モニタシステムである。このシステムで、光電子増倍管による宇宙線信号の取得ができることは既に

確認済みであるため、まずは目視でシャッターが稼働することを確認した。

次に試験で得られた HV 印加電圧とシステム印加電圧のデータを図 5.3 に示す。7 月までのデータは HV 印加電圧が正常に取得できない問題が発生していたため、HV 印加中に電力モニタの電圧が下がって見えてしまっている。しかし観測期間に合わせて光電子増倍管に HV が印加されていることが確認できた。7 月 1 日以降のデータはこの問題が修正されているため、より正しく、電圧印加の時間変動が確認でき、観測動作が問題なく繰り返されていることが確認できる。このモニタから RaspberryPi が稼働し続けて電圧モニタリングと観測動作を繰り返していることが確認できた。

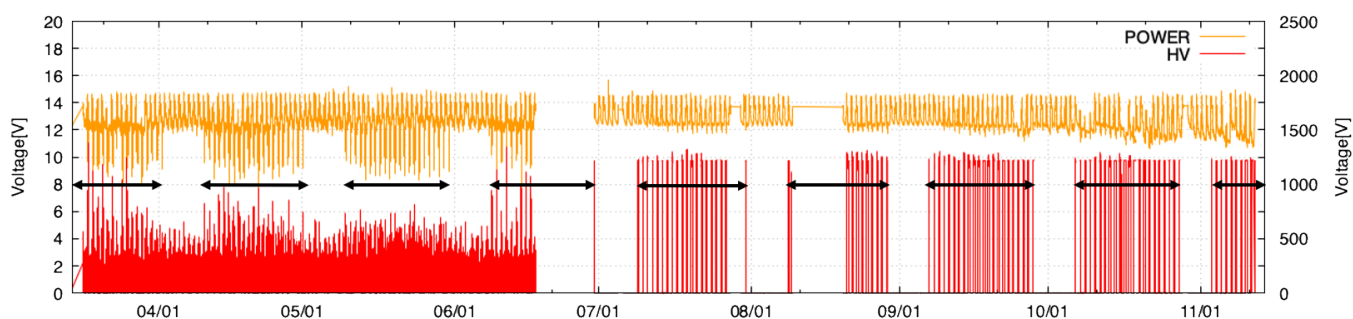


図 5.3 試験全体を通じた HV 印加電圧とシステムへの供給電圧の推移 (赤：HV 印加電圧, オレンジ：供給電圧)

表 5.1 TA 実験における観測期間

MONTH	PERIOD
3 月	2020/03/13 ~ 03/31 UTC
4 月	2020/04/11 ~ 04/29 UTC
5 月	2020/05/11 ~ 05/28 UTC
6 月	2020/06/11 ~ 06/27 UTC
7 月	2020/07/13 ~ 07/29 UTC
8 月	2020/08/12 ~ 08/28 UTC
9 月	2020/09/11 ~ 09/25 UTC
10 月	2020/10/11 ~ 10/25 UTC
11 月	2020/11/08 ~ 11/24 UTC

図中の矢印は大まかな観測期間を示す。観測期間は、日没後日昇前で月がない時間に限られており、そのような時間が 1 時間以上ある場合は観測期間内、1 時間未満の場合は観測期間外となる。参考として TA 実験で設定されている観測期間を表

5.1 に示す。TA 実験では観測可能時間が1時間以上ではなく2時間以上から観測するよう設定されているため厳密に CRAFFT 望遠鏡での設定と一致しないが、この観測期間と HV 印加電圧モニタの変動がほとんど一致していることが確認できた。途中で機能の追加や問題への対処を行なった期間を除いても、合計の期間は、現在までで6ヶ月間連続で稼働し続けており、今後も継続して試験を行う予定である。

### 5.2.1 試験で得られた問題点

今回の長期試験で2つの問題が確認された。

1つ目はエレキの排熱問題である。図5.3のモニタ中で空乏となっている6/19～6/29はWXT ウェザーモニタのインストールとHVモニタの修正の期間、7/25～7/27は簡易モニタのインストール期間である。一方でモニタ中で8/10～8/20にRaspberryPiが意図せず停止していた期間が存在した。この期間について各種モニタを調査した結果から、オーバーヒートによってRaspberryPiが停止した可能性が高いことが判明した。

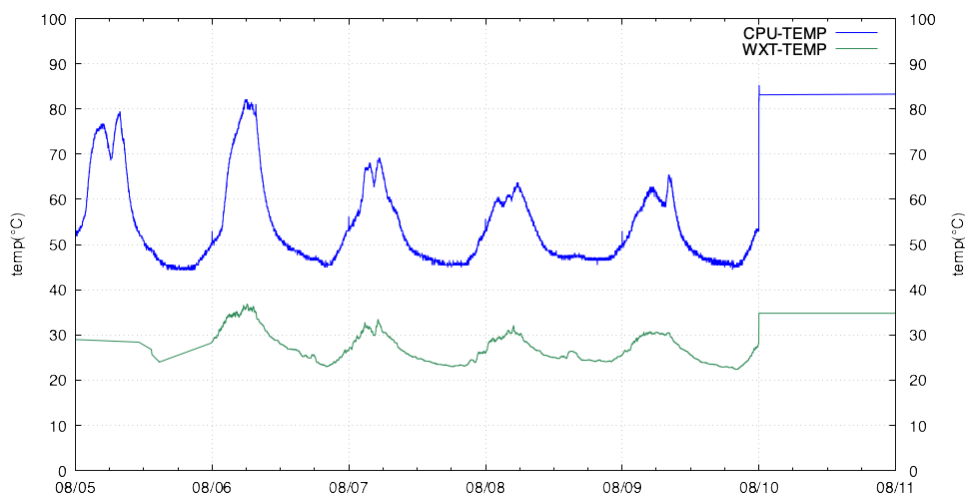


図 5.4 問題発生前数日の気温と CPU 温度の推移

表 5.2 長野市の最高気温と最低気温

日付	8/5	8/6	8/7	8/8	8/9	8/10
最高気温 (°C)	32.9	34.6	30.5	29.8	29.4	36.6
最低気温 (°C)	22.5	22.5	23.0	22.4	23.4	21.6

問題が発生した日付前後の気温と RaspberryPi の CPU 温度を抽出したグラフを図 5.4 に示す。また、表 5.2 に直前の長野市の最高気温と最低気温を示す。RaspberryPi には、85 °C を超えると CPU 使用率を下げることによって CPU 温度を抑える機能が搭載されている。問題が発生した当日は最高気温が前日に比べて高く、さらにシステムによるリブートが最も気温が高くなる 13 時に実行されたことにより CPU 温度が上がり続けたと考えられる。また、試験でのエレキハウジングは密閉して太陽光下に放置されているため、気温以上にハウジング内は温度が上昇することも考えられる。

2 つ目は HV 印加電圧のモニタが部分的に乱れる問題である。図 5.5 に 9 月の観測期間に該当する部分のプロットを示す。それぞれ赤がノイズ問題を起こした HV 印加電圧のモニタ、青が CPU 温度のモニタ、緑が WXT ウェザーモニタによる気温のモニタデータとなっている。プロットから 8 日～12 日、14 日～21 日にかけてモニタ値が ± 100V 程度乱れる様子が確認できる。これを CPU 温度のデータと比較すると、CPU 温度が高くなるタイミングとノイズが発生するタイミングが大まかに一致することがわかった。CPU 温度はエレキボックスの庫内温度に依存すると考えられるため、このノイズも排熱がうまくいってないことにより発生したものと推測できる。ただし、リレーモジュールの ADC 等から発生するノイズでモニタ値のみに関わるのか、HV 素子から発せられるノイズで光電子増倍管への印加電圧そのものが乱れているのかはわかっていない。

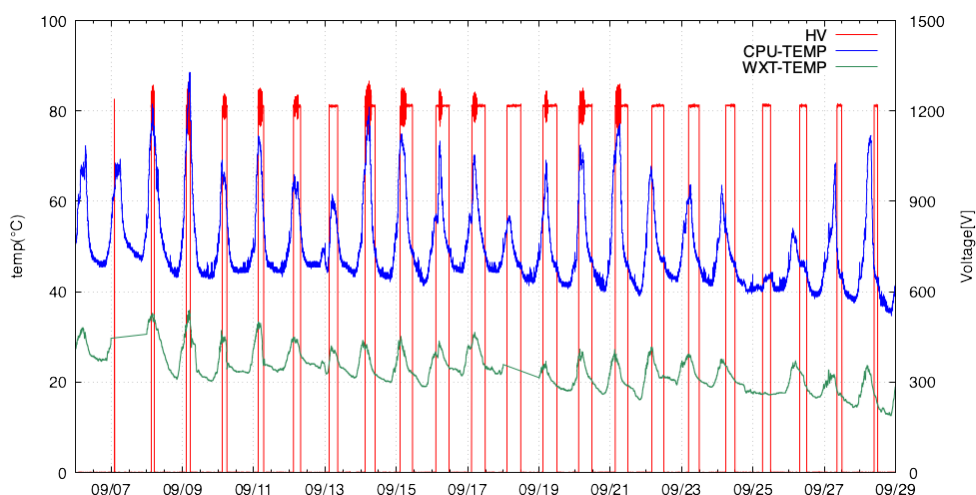


図 5.5 HV 印加電圧に発生したノイズに対する気温，CPU 温度の推移

これらの解決策として、排熱対策をエレキハウジングに施す、設置位置を日が当たらない暗所に限定するなどの方法が考えられる。

## 第6章

# 新型望遠鏡の観測判断システム

TA 実験の大気蛍光望遠鏡は、雨や強風などで観測環境が悪化した場合に観測を中断し、回復次第再開するという動作をオペレーターが手動で行う。CRAFFT 望遠鏡はフレネルレンズ搭載型の大気蛍光望遠鏡なので、TA 実験の望遠鏡と全く同じではないが同様の観測中断、観測再開を行う必要があると考えられる。また、CRAFFT 望遠鏡はオペレーターがいない前提であるため、観測中断、再開も全て自動で判断し、実行する必要がある。そのためのシステムの構築を行った。

## 6.1 観測判断に用いるパラメータ

現在簡易モニタによって得られるモニタデータのうち、雨、風速、明るさのデータは観測をコントロールするために必要なパラメータと考えられる。

観測中に雨が降った場合、レンズ面にゴミが付着するなどの原因となるため、一時的にシャッターを閉じて観測を中断するなどの対策が必要になる。また、強風が吹く場合も、シャッターの誤動作や、レンズへの影響が考えられるため同様に観測を中断する必要がある。明るさは、レンズによる集光のリスクを考慮し、万が一予定にないシャッター動作や、スケジュールのズレが起こった場合のフェールセーフのために必要となる。

## 6.2 観測判断のフローチャート

図 6.1 に観測判断のフローチャートを示す。観測判断システムは観測中は1分ごとに、観測時間外は5分ごとに常に動作させる。観測開始時のみ、その時の天候を判定して開始するか、しないかを決定する。観測時間外も判断を続けるのは、日中

にシャッターが開いてしまうなどの異常動作を検知する目的のためである。このため観測判断システムは RaspberryPi の CRON で定期的呼び出し、実行する。

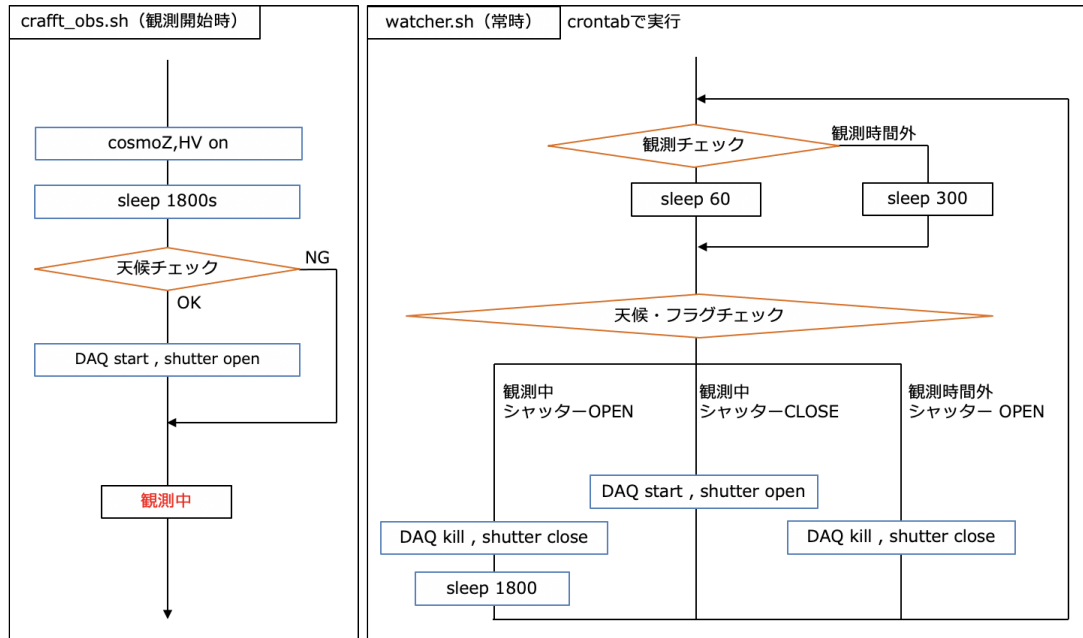


図 6.1 観測判断のフローチャート

このシステムは `~/monitor/watch.sh` で実行され、`~/monitor/upstate.sh` で抽出された最新の情報をもとに判断を行う。現在 `watch.sh` は、降雨、風速、明るさをモニタしてどれか 1 つでも異常を検出すると観測を中止する。雨は有無で判断できるが、どの風速まで観測を継続するかは今後現地などでの状態を参考にする事で具体的に決定する必要があるが、今回は TA 実験での値を参考に 15m/s に設定した。明るさは少しでも明るい状態で、かつシャッターが開いている場合にシャッターを閉めるスクリプトを実行する。また、この判断において重要となる最新のステータスを抽出するスクリプトの `upstate.sh` は、直近のデータの 1 つ前のデータを参照する。これは、最終行のデータは書き出し中の場合が多いためである。最終的には最新のデータのタイムスタンプを現在の時刻と比較して、一定時間内に得られたデータのみを抽出する必要がある。また、雨モニタで瞬間的に雨を検知するようなデータは、前後一定時間のデータと比較することで、ステータス変更を行うなどの改変が必要になると考えられる。

## 第7章

# 結論

### 7.1 まとめ

次世代の宇宙線観測に向けて，大規模展開に適した安価で完全自律観測が可能な大気蛍光望遠鏡である，CRAFT望遠鏡の開発を行っている．従来の大気蛍光望遠鏡は1台あたりのコストを考慮して，観測活動には人の手によるオペレーションと緊急事態への対処が必要であったが，CRAFT望遠鏡は大規模展開に向けて装置の低コスト化だけでなく，ランニングコストも抑える必要があった．そこで新型大気蛍光望遠鏡 CRAFT の完全自律観測化を行った．

完全自律観測システムは自律観測システム，望遠鏡保護システム，電力自給システム，環境モニタリングシステムで構成され，これらの新たなシステムを加えてもコストは100万円程度に抑えらえる．また，それぞれのシステムについて問題なく稼働することを確認した．

全てのシステムを統合して，長期間の稼働を2020年3月15日から行っており，これまでで6ヶ月以上の稼働を確認した．

### 7.2 今後の展望

今回の試験で完全自律観測は成立した．今後，完全自律観測できる CRAFT 望遠鏡に，観測に向けた最適化の完了した検出面を搭載してアメリカ合衆国ユタ州の実験サイトでの試験を行い，第1フェーズを完了する．

そのためには，望遠鏡のフェールセーフをより入念に行う必要がある．望遠鏡保護システムでは，CRAFT 望遠鏡のレンズによる装置破壊のリスク対策をさらに行う必要がある．そのためのフェールセーフシステムの導入が今後必須になると考



えられる。また、コントロールコンピューターの RaspberryPi の故障は全システムの停止につながるため、フェールセーフとしてその多重化も視野に入れる必要がある。

また、今回の試験で確認できた排熱等の問題をクリアした装置ハウジングや、望遠鏡の筐体のハウジングを新たに実装する必要がある。

これらの問題をクリアし、現地での試験を達成できれば CRAFFT 望遠鏡は次のフェーズとして複数の望遠鏡でのステレオ観測の試験に進む予定となっている。

## 参考文献

- [1] C. グルーペン 著, 小早川恵三 訳, ”宇宙素粒子物理学”, 丸善出版
- [2] TELESCOPE ARRAY PROJECT,  
”<http://www.telescopearray.org/index.php/about/what-are-cosmic-raysCosmic>”, Ray Spectra of Various Experiments
- [3] 多米田裕一郎,  
”[http://www.astro-wakate.org/ss2011/web/\\_proceedings/proceeding/\\_tameda.pdf](http://www.astro-wakate.org/ss2011/web/_proceedings/proceeding/_tameda.pdf)”, 超高エネルギー宇宙線観測の現状
- [4] TELESCOPE ARRAY PROJECT,  
”<http://www.telescopearray.org/index.php/about/detecting-uhe-cosmic-rays>”
- [5] Yoshiki Tsunesada,  
”<https://indico.snu.ac.kr/indico/event/15/session/5/contribution/720/material/slides/0.pdf>”, “TA Spectrum Summary”:Energy Spectrum Measurements With The Telescope Array Detectors
- [6] テレスコープアレイ実験 HP,  
”[http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta\\_public/index.html](http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html)”
- [7] テレスコープアレイ実験 HP,  
”[http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta\\_public/tax4.html](http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/tax4.html)”
- [8] 近畿大学 星岳彦, ”<https://www.hoshi-lab.info/env/solar-j.html>”, 日の出と日の入りの計算

## 謝辞

本研究を進めるにあたって日頃から熱心にご指導をしてくださった指導教員の富田孝幸助教に深く感謝いたします。大阪電気通信大学の多米田裕一郎講師，神奈川県大学の池田大輔助教，中部大学の山崎勝也助教には毎週の CRAFT 実験の会議にて丁寧な指導と数多くの助言をいただきました。また，信州大学の山本真周氏，岩倉広和氏には日々の研究に多くの助言とご指導をいただきました。齊藤保典教授にはゼミ等で多くの助言をいただきました。ありがとうございます。

日々の研究生活において，多くの議論と助言をいただいた，佐野賢吾氏，切中拓也氏，曾根直宙氏には大変お世話になりました。

研究室の中村凌氏，関皓月氏，西村彰氏，稲富大地氏，上濱孝文氏，宇都宮成弥氏，窪田悠人氏，中澤新氏，中村智行氏，柴崎悠馬氏，栗栖慎之介氏，吉岡翼氏，斎藤亮介氏，池田国弘氏，寺西大吉氏，櫻井祐輔氏，菅野晃輝氏，熊谷陽介氏には日頃のゼミや研究生活において大変お世話になりました。

皆さま，本当にありがとうございました。