

修士学位論文

論文題目

次世代型極高エネルギー宇宙線観測用大気蛍光望遠鏡のための波形フィット法による
宇宙線空気シャワー再構成手法の開発と解析精度および解析効率の調査

専攻	工学専攻
コース	先端理工学コース
学生番号	<u>ME21A004</u>
氏名	<u>西尾 瑛司</u>
担当指導教員	<u>多米田 裕一郎</u>
申請年月日	<u>2023年 2月 13日</u>

2023年 2月 日

大阪電気通信大学大学院
工学研究科長

専攻 工学専攻

コース 先端理工学コース

学生番号 ME21A004

氏名 西尾 瑛司

修士学位論文目録

学位論文題目

次世代型極高エネルギー宇宙線観測用大気蛍光望遠鏡のための
波形フィット法による宇宙線空気シャワー再構成手法の開発と
解析精度および解析効率の調査

関連する業績等

国内学会

- 西尾瑛司、多米田裕一郎、鍵谷 鷹、柴田規迪、 富田孝幸、窪田悠人、中村雄也、池田大輔、山崎勝也・CRAFTT実験11:波形フィットによる宇宙線空気シャワー再構成手法の開発・日本物理学会 2021年秋季大会(2021年9月14日13時30分 - 17時30分)・オンライン
- 西尾瑛司・波形フィットによる宇宙線シャワー再構成手法の開発・第6回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会(2021年11月5日13時40分 - 14時00分)・東京大学柏キャンパス
- 西尾瑛司・次世代型大気蛍光望遠鏡のための波形フィットによる宇宙線空気シャワー再構成手法の開発・第五回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会(2022年3月22日17時25分 - 17時45分)・東京大学柏キャンパス
- 西尾瑛司・CRAFTT望遠鏡のための波形フィットによる宇宙線空気シャワー再構成手法の開発・第7回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会(2022年12月10日10時10分 - 10時30分)・東大宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設

その他

- Eiji Nishio・Development of reconstruction method for CRAFTT・TA All Meeting(2022/Dec/19/11:15 - 12:15 JST)

担当指導教員 多米田 裕一郎

修士学位論文の概要 (2000字程度)

論文題目次世代型極高エネルギー宇宙線観測用大気蛍光望遠鏡のための
波形フィット法による宇宙線空気シャワー再構成手法の開発と
解析精度および解析効率の調査

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことを“宇宙線”という宇宙線は電荷を持つため、宇宙空間の磁場の影響で運動方向が曲げられ方向性を失ってしまう。そのため、宇宙線の起源は未だ未解明である。そこで、宇宙空間の磁場の影響をほぼ受けず、宇宙空間を直進することが出来る 10^{18} eV以上エネルギーを持つ極高エネルギー宇宙線の観測を行うことで、到来方向を求める。そうすることで、宇宙線起源天体の同定が期待されている。宇宙線は、高エネルギーになるにつれ地球への到来頻度が減少する。極高エネルギー宇宙線に至っては、到来頻度が 1 km^2 に1年で1個程度に減少してしまう。また、宇宙線の起源解明に質量組成の測定が必要である。大気蛍光望遠鏡(FD)はその質量組成の観測に有用である。しかし、FDは月のない晴れた夜間しか観測できないため1年のうち10%程度でしか稼働することができない。そのため、観測範囲を拡大し観測統計量を増やす必要がある。しかし、FDは一台当たりのコストが非常に高く、装置の安全上遠隔地から手動で行われているため、人件費などの運用コストも高い。従って、実験の大規模化が難しい。そこで、宇宙線観測実験の大規模化を行うために、低コストかつ完全自動で宇宙線を観測することが出来る大気蛍光望遠鏡 Fluorescence Fresnel lens Telescope (CRAFTT)の研究・開発を行っている。

2017年にCRAFTTの宇宙線観測能力が実証された。しかし、CRAFTTは、低コスト化に伴いシンプルな構造をしているため、FDよりも低空間分解能である。そのため、FDでは宇宙線空気シャワーを幾何的に観測できるがCRAFTTでは観測することが出来ずFDとは異なる信号が検出される。それゆえ、既存の再構成手法を用いることはできず、従来の手法で宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点を推定することが不可能である。そこで、新たに宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点を解析する手法が必要になる。CRAFTTは、宇宙線を観測した際に波形信号を検出する。この波形は到来方向や落下地点、エネルギーなどによって形が異なる。そこで、波形を用いた再構成手法“波形フィット法”を開発した。

本研究では、波形フィット法を用いた到来方向、落下地点、エネルギーを決定する解析手法を開発、解析精度および解析効率の調査、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。その際、検出器シミュレーションを用いて、観測が期待される疑似波形と様々な条件の疑似波形を生成し、解析手法の開発や解析精度や効率の調査を行った。まず、波形フィット法を用いた到来方向、落下地点、エネルギーを決定する解析手法の開発を行った。その後、波形フィットで再構成した際に各パラメータにおける精度を知るために、到来方向と落下地点の解析精度の調査を行った。さらに、CRAFTTが宇宙線として判断した信号をどの程度解析が行えるのか見積もるために解析効率の調査を行い、再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴の調査を行った。最後に、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。波形フィット法の閾値は 9σ ($\sigma=6.4$)である。しかし、これが適性であるか調査されていない。そこで、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。

専攻 工学専攻

学生番号

ME21A004

コース

氏名

先端理工学コース

西尾 瑛司

目次

第 1 章	序論	2
第 2 章	極高エネルギー宇宙線	5
2.1	宇宙線	5
2.1.1	一次宇宙線のエネルギースペクトル	6
2.1.2	宇宙線の質量組成	8
2.1.3	宇宙線の加速機構	10
	フェルミ加速機構	11
	フェルミの 2 次加速	11
	フェルミの 1 次加速	14
2.2	空気シャワー現象	15
2.3	起源モデル	18
第 3 章	宇宙線観測実験	19
3.1	過去の宇宙線観測実験	19
3.1.1	AGASA	19
3.1.2	HiRes	20
3.2	現在の宇宙線観測実験	20
3.2.1	Telescope Array	21
3.2.2	地表粒子検出器 (SD)	24
	光電子増倍管 (PMT)	26
3.2.3	大気蛍光望遠鏡 (FD)	27
3.2.4	Pierre Auger Observatory	30

第 4 章	フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡 (CRAFFT)	31
4.1	CRAFFT-prototype の概要	31
4.2	現行の大気蛍光望遠鏡との比較	34
4.3	CRAFFT-prototype の宇宙線空気シャワー観測性能	35
4.4	CRAFFT 実験の将来計画	37
第 5 章	CRAFFT Java	39
5.1	空気シャワーシミュレータ	39
5.1.1	CRAFFTjava の空気シャワーシミュレーター	40
	望遠鏡の設置座標・視野方向	40
5.2	レイトレースシミュレーター	42
5.2.1	ROOT-Based Ray-Tracing Library for Cosmic-Ray Telescopes (ROBAST)	42
5.2.2	レイトレースシミュレーターの開発	42
	フレネルレンズの実装	43
	フレネルレンズ以外の実装	44
第 6 章	波形フィット法を用いた宇宙線空気シャワーの再構成	46
6.1	研究目的	46
6.2	研究概要	48
6.3	観測波形の違い	50
6.4	夜光ノイズの考慮	53
6.5	S/N 比の計算	56
6.6	波形フィット法について	58
6.7	観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成	60
6.7.1	到来方向 (天頂角, 方位角) と落下地点 (X, Y) , の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成 [27]	60
6.7.2	到来方向, 落下地点 (X, Y) , エネルギーの 5 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成	64
第 7 章	到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似	

	波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成の解析精度	69
第 8 章	到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似 波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成の解析効率	81
第 9 章	波形フィット法の閾値の最適化の検討	92
第 10 章	結論	99
10.1	まとめ	99
10.2	今後の展望	100
参考文献		104

第 1 章

序論

本研究は, 次世代型極高エネルギー宇宙線観測用大気蛍光望遠鏡のための波形フィット法による宇宙線空気シャワー再構成手法の開発と解析精度および解析効率の調査を行っている。

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことを”宇宙線”という。自然界には様々な放射線が存在する。自然界には様々な放射線が存在する。宇宙線も自然に存在する放射線の一つである。そして, 地球に絶えず降り注いでいる。宇宙空間を飛び交っている宇宙線を一次宇宙線, 地球に飛来した宇宙線を二次宇宙線という。宇宙線は, 1912年にオーストラリアのヘス (Victor Franz Hess) が気球で高度と放射線の強さの関係を測定したことにより発見された。その後, 様々な実験で観測され, エネルギー領域が 10^8 – 10^{20} eV を超える広範囲の宇宙線が観測されている。その中でも極めて高いエネルギーを持つ宇宙線を観測する宇宙線観測実験の 1, つに Telescope Array (TA) 実験がある。TA 実験は, 日米韓露白共同のもとアメリカ・ユタ州で 2008 年から観測が始まり, 現在も行われている。観測面積は, 約 700 km^2 である。そこに, 507 台の地表粒子検出器 (SD) を 1.2 km 間隔で設置している。その周囲に 3 ステーション 38 基 (1 ステーション 12 または 14) の大気蛍光望遠鏡 (FD) の 2 種類の検出器を用いて超高エネルギー宇宙線の観測を行っている。

TA 実験は宇宙線の起源を解明を目標に宇宙線の観測を行っている。しかし, 宇宙線は電荷を持つため, 宇宙空間の磁場の影響で運動方向が曲げられ方向性を失ってしまう。そのため, 宇宙線の起源は未だ未解明である。そこで, 宇宙空間の磁場の影響をほぼ受けず, 宇宙空間を直進することが出来る極めて高いエネルギーを持つ宇宙線の観測を行うことで, 到来方向を求める。そうすることで, 宇宙線起源天体の同定が期待されている。そのため, TA 実験

では, 10^{18} eV 以上エネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線の観測を行い, 宇宙線の起源解明を行っている。

CRAFFT 実験は, 宇宙線観測実験の大規模化を行うために, 低コストかつ完全自動で宇宙線を観測することが出来る大気蛍光望遠鏡の研究・開発を行っている。宇宙線の起源解明には, 宇宙線の「エネルギースペクトル」, 「質量組成」, 「到来方向分布」の測定が必要である。その中で「質量組成」の測定に FD は有用である。また, 宇宙線は, 高エネルギーになるにつれ地球への到来頻度が減少する。極高エネルギー宇宙線に至っては, 到来頻度が 1 km^2 に 1 年で 1 個程度に減少してしまう。さらに, FD は月のない晴れた夜間しか観測できないため稼働率は SD の 10% 程度である。そのため, 観測範囲を拡大し観測統計量を増やす必要がある。しかし, FD は一台当たりのコストが非常に高く, 装置の安全上遠隔地から手動で行われているため, 人件費などの運用コストも高い。従って, 実験の大規模化が難しい。そこで, 宇宙線観測実験の大規模化を行うために, 低コストかつ完全自動で宇宙線を観測することが出来る大気蛍光望遠鏡 Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope(CRAFFT) の研究・開発を行っている。そして, CRAFFT を用いて実験の大規模化を行い, 宇宙線起天体の同定を行う。

2017年に CRAFFT の宇宙線観測能力が実証された。しかし, CRAFFT は, 低コスト化に伴いシンプルな構造をしているため, FD よりも低空間分解能である。そのため, FD では宇宙線空気シャワーを幾何的に観測できるが CRAFFT では観測することが出来ず FD とは異なる信号が検出される。それゆえ, 既存の再構成手法を用いることはできず, 従来の手法で宇宙線のエネルギーや到来方向, 落下地点を推定することが不可能である。そこで, 新たに宇宙線のエネルギーや到来方向, 落下地点を解析する手法が必要になる。CRAFFT は, 宇宙線を観測した際に波形信号を検出する。この波形は到来方向や落下地点, エネルギーなどによって形が異なる。そこで, 波形を用いた再構成手法”波形フィット法”を開発した。波形フィット法は観測波形と CRAFFTjava で生成した様々な条件の疑似波形を比較し, 観測波形と一致する波形を探索する手法である。波形フィット法は最小二乗法を自由度で割った値 $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を評価指標とし, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さければ一致が高いことを表している。

本研究では, 波形フィット法を用いた到来方向, 落下地点, エネルギーを決定する解析手法を開発, 解析精度および解析効率の調査, 波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。2019年度卒の鍵谷が波形フィット法を用いて到来方向と落下地点を決定する解析手法を開発した。しかし, 到来方向と落下地点, エネルギーを決定する解析手法について開発されていない。そこで, それらを決定する解析手法について開発した。本研究では, CRAFFTjava とい

う検出器シミュレーションを用いて、観測が期待される疑似波形と様々な条件の疑似波形を生成し、解析手法の開発を行った。その後、波形フィットで再構成した際に各パラメータにおける精度を知るために、到来方向と落下地点の解析精度の調査を行った。さらに、CRAFFT が宇宙線として判断した信号をどの程度解析が行えるのか見積もるために解析効率の調査を行った。その際、解析精度の調査と同様の観測が期待される疑似波形を用いた。その結果から再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴の調査を行った。最後に、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。CRAFFT は、観測の際に S/N 比を閾値として設定している。S/N 比とは信号 (Signal) と雑音 (Noise) の比である。CRAFFT はこれを 9σ ($\sigma=6.4$) としている。そのため、波形フィット法の閾値も 9σ に設定している。しかし、閾値 9σ が適性であるか調査されていない。そこで、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。

本論文は、全 8 章で構成されている。第 2 章から第 5 章までは宇宙線や宇宙線観測実験や次世代型大気蛍光望遠鏡などの研究背景について、第 6 章は波形フィット法を用いた到来方向、落下地点、エネルギーを決定する解析手法を開発について、第 7 章は波形フィット法の到来方向、落下地点の解析精度の調査について、第 8 章は波形フィット法の到来方向、落下地点の解析効率の調査について、第 9 章は波形フィット法の閾値の最適化の検討について述べる。

第 2 章

極高エネルギー宇宙線

10^{20} eV を超えるエネルギーをもつ宇宙線を極高エネルギー宇宙線 (Ultra-High Energy Cosmic Rays, UHECRs) という。そして、宇宙空間で最も高いエネルギーの粒子である。このような極めて高いエネルギーをもつ宇宙線の起源や加速機構はまだ解明されていない。活動銀河核 (active galactic nuclei, AGN) やガンマ線バースト (gamma ray burst, GRB) などの超激的な天体現象を起源とすると考えられている。極高エネルギー宇宙線は、宇宙空間の磁場に影響されず宇宙空間を直進するという性質を持っている。そのため、この宇宙線を観測することでの起源の特定に大きく近づくのではないかと期待されている。極高エネルギー宇宙線の起源の解明には、宇宙線の「エネルギースペクトル」、「質量組成」、「到来方向分布」の測定が必要である。しかし、極高エネルギー宇宙線の到来頻度は、 1 km^2 に 1 年に 1 個程度である。したがって、観測には広大な有効検出面積と長い観測時間は必要となる。

本章では、宇宙線について述べる。

2.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことである。自然界には様々な放射線が存在する。宇宙線も自然に存在する放射線の一種である。そして、地球に絶えず降り注いでいる。宇宙空間を飛び交っている宇宙線を一次宇宙線、地球に飛来した宇宙線を二次宇宙線という。宇宙線は 1912 年にオーストラリアのヘス (Victor Franz Hess) により発見された。ヘスは、高度 5 km の位置まで気球に乗り、高度と放射線の強さの関係を測定した。こ

の測定により上空に行くにつれて放射線強度が増加することを発見し、宇宙降り注いでいる放射線を発見した。宇宙線は、これまで様々な実験で観測されてきた。そのエネルギー領域は、 10^8 – 10^{20} eV を超える広範囲である。低いエネルギーをもつ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いる。その構成粒子は原子核・陽子・電子・光子など様々である。しかし、 10^{20} eV を超えるエネルギーをもつ極高エネルギー宇宙線は未解明なことが多い。例えば、極高エネルギー宇宙線は宇宙空間での爆発的な天体現象や未知の物理現象が起源と考えられている。だが、到来頻度が非常に少なく、観測統計量の少なさから、確かな証拠は見つかっていない。

2.1.1 一次宇宙線のエネルギースペクトル

図 2.1 に一次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。縦軸は微分フラックス、横軸はエネルギーを対数で表している。微分フラックスとは、積分すると宇宙線が到来した個数を示す量である。図 2.1 より、エネルギーが増加するにつれ宇宙線の到来頻度が小さくなる。例えば、極高エネルギー宇宙線の到来頻度は、 1 km^2 に 1 年に 1 個程度である（東京ディズニーリゾート (2 km^2) に 1 年間で 2 個程度）。

また、 10^{20} eV 付近でスペクトルの折れ曲がりがある。その構造を見るために、縦軸にエネルギーの 3 乗をかける必要がある。図 2.2 に一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの 3 乗を掛けたものを示す。縦軸は微分フラックスエネルギーの 3 乗を掛けたもの、横軸はエネルギーを対数で表している。図 2.2 より、 10^{15} 、 10^{18} 、 10^{19} eV 付近にスペクトルの急な折れ曲がりがある。その要因は、宇宙線の起源が銀河系内から銀河系外へ遷移したために起こったものと考えられている。

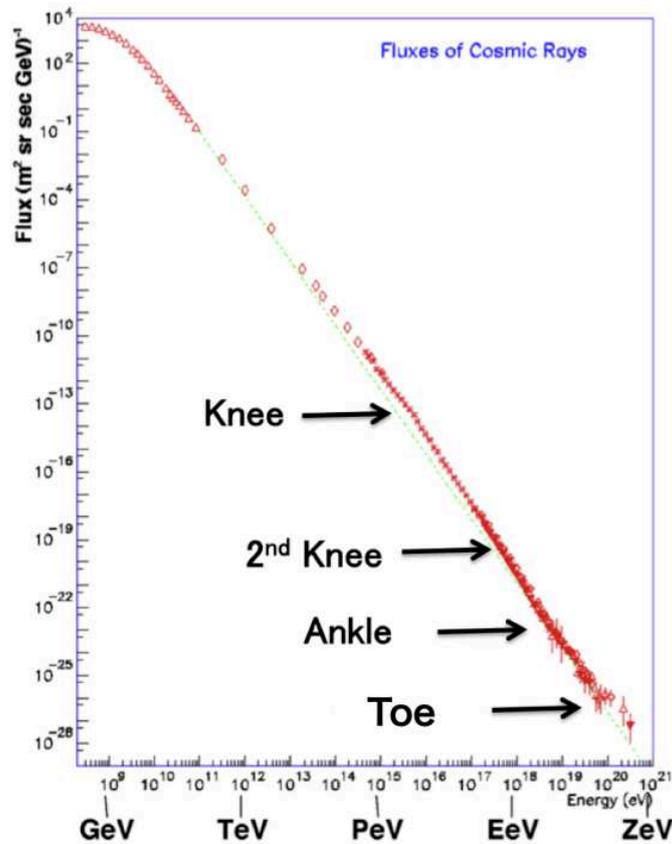


図 2.1 一次宇宙線のエネルギースペクトル [1]. 縦軸は微分フラックス, 横軸はエネルギーを対数で表している. 微分フラックスとは, 積分すると宇宙線が到来した個数を示す量である.

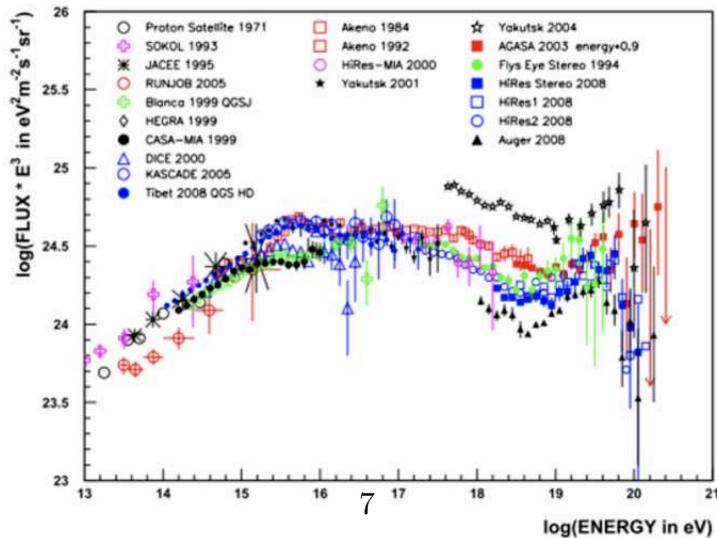


図 2.2 一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの 3 乗を掛けたもの [2]. 縦軸は微分フラックスエネルギーの 3 乗を掛けたもの, 横軸はエネルギーを対数で表している.

宇宙線のエネルギーが 10^{15} eV 付近のスペクトルの領域を” knee” と呼んでいる。knee までのエネルギースペクトルのべきは、およそ 2.7 である。宇宙線のエネルギーが knee 以下は銀河磁場によるジャイロ運動の半径が銀河円盤の厚さより十分小さいため、円盤の中に閉じ込められている。一方で、knee 以上のエネルギーでは銀河磁場への閉じ込めが困難になり宇宙線が円盤から漏れ出し始める。そうすることで、スペクトルのべきが大きくなり強度が急激に減少していると考えられている、また、knee 領域の宇宙線の起源は、超新星残骸の衝撃波加速によるものだと考えられているが確かな証拠は見つかっていない。

宇宙線のエネルギーが 10^{18} eV 付近のスペクトルの領域を” ankle” と呼んでいる。ankle のエネルギースペクトルのべきは、およそ 3.0 である。そのため、ankle を超えると、knee よりも急勾配な領域になる。knee 領域のエネルギー帯の宇宙線の起源は、銀河系内であると考えられているが、ankle 領域では銀河系内と銀河系外の宇宙線が混存しているため、このような急なエネルギースペクトルの折れ曲がりがあると考えられている。また、ankle 領域の宇宙線の起源は、天体によるものか宇宙の大規模構造 (LSS) によるものなのか未解決な問題の一つである。

宇宙線のエネルギーが 10^{19} eV 以上では、ジャイロ半径が銀河円盤の厚さと同程度かそれ以上となる。そのため、銀河内への閉じ込めが困難になり、宇宙線の起源は銀河系内から銀河系外へと遷移すると考えられている。なぜなら、 10^{19} eV 程度以上の宇宙線が銀河系内で生成された場合、源の方向もしくは銀河中心の方向から大きな強度が観測されるはずである。しかし、一様の方向からの宇宙線が観測されているためである。

宇宙線のエネルギーが 10^{20} eV 付近のスペクトルの領域を” toe” と呼んでいる。toe 領域の宇宙線の起源は、銀河系外であると考えられており、活動銀河核 (AGN) や γ 線バーストなどが起源候補だと考えられている。

2.1.2 宇宙線の質量組成

図 2.3 に宇宙線と太陽系の質量組成を比較を示す。図 2.3 は地球で測定された宇宙線の質量組成元素量 (He-Ni) と太陽系の元素量で比較 (全て Si に対する相対値) している。縦軸は相対量、横軸は各電荷数を表している。黒丸は $70\text{--}280\text{ MeV } n^{-1}$ の低エネルギー、白丸は $1000\text{--}2000\text{ MeV } n^{-1}$ の高エネルギーの宇宙線、ダイヤは、太陽系を表している。図 2.3 より、陽子が最も多く ($\approx 85\%$)、その次に α 粒子が続く ($\approx 12\%$)。そして、電荷 $Z \geq 3$ の原子核は一次荷電宇宙線中わずか 3% である。

また,宇宙線の化学組成を宇宙の化学組成と比較すると多くの点でと似ている. そのため,星の中で合成された原子核が何らかの形で加速されて宇宙線となっていることを示している. しかし,リチウムベリリウム,ホウ素 ($Z=3-5$) や鉄族以下 ($20 < Z < 26$) の元素に大きな違いがある. 宇宙線に含まれるリチウムベリリウム,ホウ素の量が多いのは,銀河物質の中で重い原子核である炭素 ($Z=6$) や酸素 ($Z=8$) が,宇宙線源から地球にやってくる途中で断片化したためと考えられる. 同様に比較的豊富にある鉄核の分裂や破碎反応によって鉄族以下の元素が生成されるためである. 宇宙線の質量組成は,宇宙線の原子核がどのように合成,加速,伝播してきたのかが反映されているはずである. そのため,宇宙線中の放射性同位体比や重元素比の調査を行うことで宇宙線の起源の解明に近づくと考えられる.

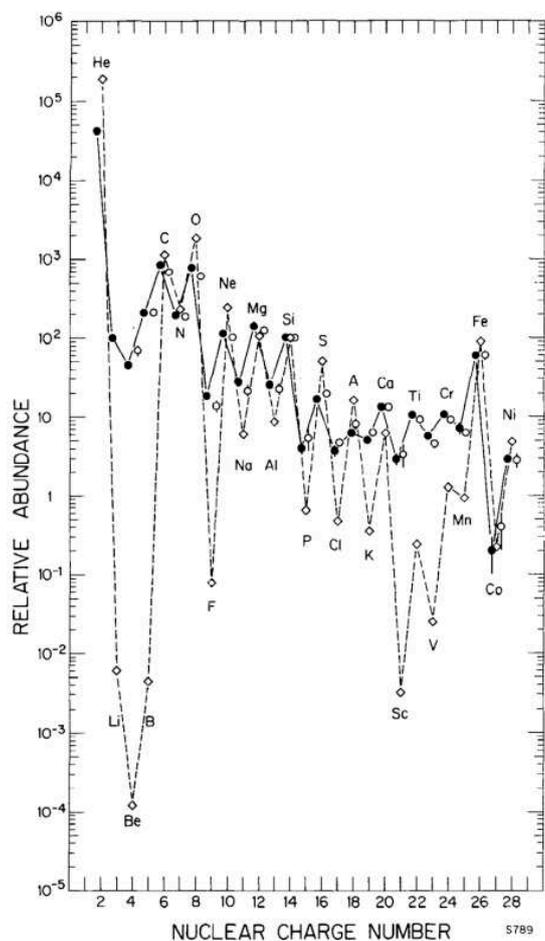


図 2.3 地球で測定された宇宙線の質量組成元素量 (He-Ni) と太陽系の元素量との比較 (全て Si に対する相対値) [3]. 縦軸は相対量, 横軸は各電荷数を表している. 黒丸は $70\text{--}280 \text{ MeV } n^{-1}$ の低エネルギー, 白丸は $1000\text{--}2000 \text{ MeV } n^{-1}$ の高エネルギーの宇宙線, ダイヤは、太陽系を表している.

2.1.3 宇宙線の加速機構

宇宙線の加速機構については, 多くの議論がなされているが, 未解明である. まず, 宇宙線の起源を論じる時 パワーの源と加速機構を区別する必要がある. それは, 宇宙線はパルサーのような加速される現場で粒子の相互作用によって生成できるからである. そして, 加速機構だけでなく, 近くにある超新星残骸や活動銀河核の電磁ポテンシャルや重力ポテンシャル

によって加速が促進される。そのため、宇宙線のほとんどの場合、その源で作られ、源の中あるいはその周辺で高エネルギーまで加速される。そのため、宇宙線の生成や加速する現場の候補は、超新星爆発・残骸、強く磁化され高速回転している中性子星（パルサー）、中性子星の連星系、降着している巨大ブラックホール、 γ 線バースト、Fermi バブル、活動銀河核の中心部やある源からエネルギーをもらった宇宙線粒子が星間や銀河間の媒質内を伝播する間に広がったガス雲との相互作用で加速などが挙げられる。そのため、加速のシナリオに応じて、拡散的（確率的）なメカニズムと誘導的（ワンショット、または直接）なメカニズムを検討する必要がある [4]。これらは、加速する場の構成がシンクロトロン（例えば大規模ジェット）に対応しているか、それとも曲率が支配する（中性子星やブラックホール）損失に対応するかによって決まる。拡散プロセスの代表的な例は、フェルミの1次および2次（衝撃波）加速である。また、誘導的なメカニズム代表的な例は、粒子は大規模な電場によって連続的に加速され、その後、加速器から離脱する。

本章では、加速機構について最も有力視されているのがフェルミ機構について述べる。

フェルミ加速機構

フェルミ加速機構は、イタリアの物理学者エンリコ・フェルミが1949年に提唱した加速モデルである。荷電粒子が衝撃波によって（1次加速）あるいは、磁化された雲によって（2次加速）加速されることである [5]。

■**フェルミの2次加速** フェルミの2次加速とは、磁化された雲によって加速されることである。フェルミの2次加速（フェルミによる最初の加速メカニズム）によって宇宙線はエネルギーを得る。なぜなら、宇宙に存在する磁場を伴った沢山の磁化された雲（磁気雲）と宇宙粒子の乱雑な運動（乱流）により、宇宙線が何度も散乱される。そして、この乱雑な運動からエネルギーを得る。

図2.4に磁気雲からの反射による粒子のエネルギー獲得の様子を示す。図2.4のように速度 v で動いている粒子が速度 u で動いている雲で反射されるとする。この時、粒子と雲の運動ベクトルが反平行ならば（右方向正とする）、粒子は以下のエネルギーを得る

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2}m(v+u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2uv + u^2) \quad (2.1)$$

反対に粒子と雲の運動ベクトルが平行ならば、粒子は以下のエネルギーを失う。

$$\Delta E_2 = \frac{1}{2}m(v - u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(-2uv + u^2) \quad (2.2)$$

そのため、正味の平均の値である以下のエネルギーを得る。

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = mu^2 \quad (2.3)$$

そして、最初のエネルギーとの比は以下のようになる。

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\frac{u^2}{v^2} \quad (2.4)$$

この機構は、衝突ごとに得るエネルギーが運動速度の 2 乗に比例することから、「フェルミの 2 次加速」と呼ばれている。

式 2.4 の結果は相対論的取り扱いをしても問題ない [7].

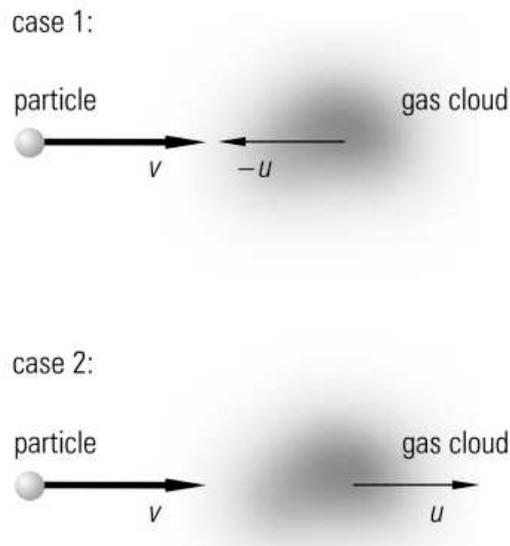


図 2.4 磁気雲からの反射による粒子のエネルギー獲得の様子 [6]

図 2.5 にフェルミの 2 次加速のイメージを示す。図 2.5 より、相対論的な粒子の加速を星間雲との衝突によって粒子は雲に反射されることを示している。そして、これらの雲はランダ

ムに動き, 「磁気の鏡」として機能する.

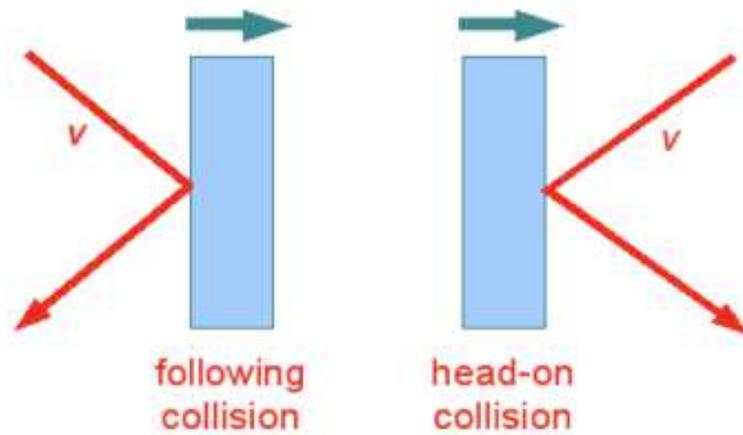


図 2.5 フェルミの 2 次加速 [8].

いくつかの計算 [7] の結果, 1 回の衝突で得られる平均的なエネルギーは, 以下のようになる.

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{8}{3} \left(\frac{u^2}{v^2} \right) \quad (2.5)$$

そして, 衝突と衝突の間の平均時間を計算すると, 式 2.9 からエネルギーレートを求めることができる.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} \left(\frac{v^2}{cL} \right) E = \alpha E \quad (2.6)$$

この時, L はフィールドラインに沿った雲間の平均自由行程, c は光速である.

雲の速度 u は粒子の速度 v に比べかなり小さい ($u \ll v \approx c$) ため, 一回の衝突によるエネルギー獲得は非常に小さい. 従って, このフェルミ機構による粒子加速は非常に長い時間必要である. このモデルの加速は, 通常ガス雲ではなく磁化された雲を想定する. そのため, ガスの密度が高く, 衝突する確率も大きくなる. しかし, 2 次加速でべき乗のエネルギー

スペクトルを生成することに成功したとしても、完全に満足できるメカニズムではない。

■**フェルミの1次加速** 1次加速は、2次加速に比べて (v/c) に線形なエネルギー利得を得ることができる。特に v の値が比較的高い場合に加速プロセスをより効果的にする。それは、相対論的粒子が、超音速（星間雲の速度の103倍）に達する可能性のある強い衝撃波（例えば、超新星爆発や活動銀河核などで生成されるようなもの）に衝突したときに起こる。しかし、衝撃の両側で星間ガスが静止している場合は、衝撃の背後の乱れと前方の不規則性があるため、粒子の速度分布は等方的である。その結果、高エネルギー粒子が衝撃の下流から上流へ、あるいは上流から下流へと渡るとき、完全な対称性がある。

図2.6にフェルミの1次加速のイメージを示す。図2.6より、どちらの場合も粒子はエネルギーを獲得する。そのため、1回の往復で平均的なエネルギー獲得量は以下ようになる。

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \left(\frac{u}{v} \right) \quad (2.7)$$

また、衝撃からの粒子脱出確率 P_{esc} も考慮しなければならない。そこで、運動論を用いると、粒子脱出確率 P_{esc} は以下ようになる。

$$P_{esc} = \frac{4}{3} \left(\frac{u}{v} \right) \quad (2.8)$$

この2つのパラメータをエネルギースペクトル $N(E)$ に置き換えると、以下ようになる。

$$N(E)dE = const. \times E^{-2}dE \quad (2.9)$$

観測された2.7という指数はまだ得られていない。しかし、衝撃波はさまざまな天体物理学的環境に存在することが予想されるため、1次のメカニズムは最も効果的で可能性が高く、非常に有望であると考えられている。

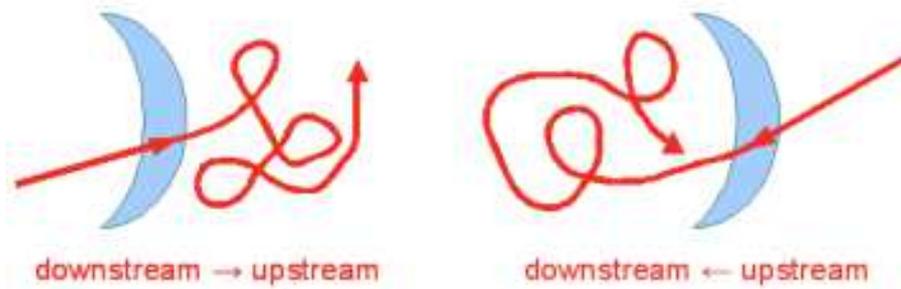


図 2.6 フェルミの 1 次加速 [8]

2.2 空気シャワー現象

宇宙線空気シャワーとは、高エネルギーの宇宙線粒子が大気中を降下するとともに電子、ミューオン (μ), パイオン (π), K 粒子, 核子の大量となって大地まで到達していく現象のことである。

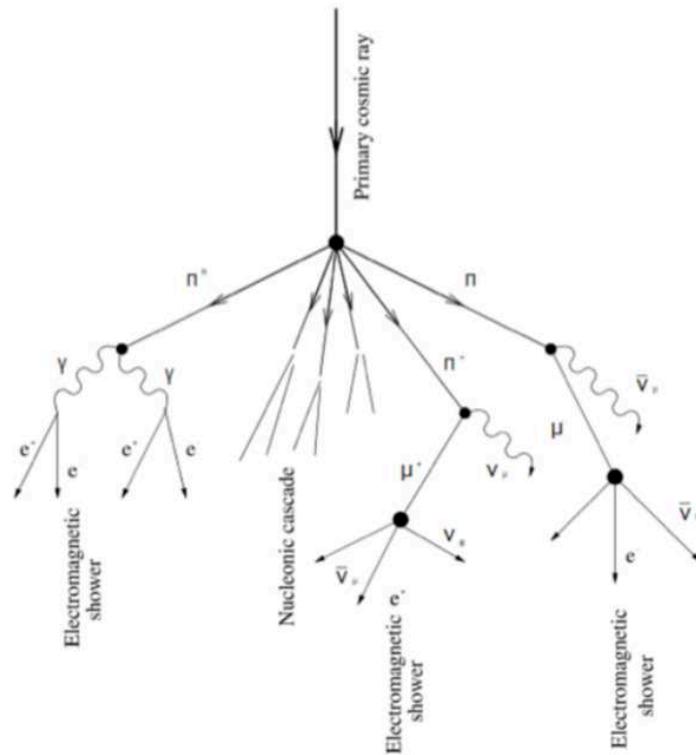


図 2.7 宇宙線空気シャワーの模式図 [9]

図 2.7 に宇宙線空気シャワーの模式図を示す. 大気に突入した宇宙線は大気の頂点 (およそ地上 100 km 付近) で大気中の原子核と相互作用を起こす. しかし, 確率で起こるため必ずしもこの限りではない. 相互作用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. この二次粒子の大半はパイオン (π^0, π^\pm) である. π^0 は寿命が短く (平均寿命; $(8.52 \pm 0.18) \times 10^{-17}$ s [10]), 大部分が大気中の原子核と相互作用する前 (10^{-15} s) に 2 つの γ 線に崩壊する.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (2.10)$$

その後, γ 線は電子対生成により電子と陽電子を生成する.

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (2.11)$$

そして、電子と陽電子は制動放射 (荷電粒子 (電子) が原子核のクーロン場で曲げられる際に光子を放出する現象; 式 2.12) や電子陽電子の対消滅 (式 2.13) によりさらに複数の γ 線を放出する。

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma \quad (2.12)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \quad (2.13)$$

このように高エネルギーの 2 次粒子がさらに相互作用をしていき、次々と 2 次粒子が生成される現象を電磁カスケードと言う。

一方で、10 GeV 以下の π^\pm はほとんど崩壊 貫通性があるミューオン (μ^\pm) やニュートリノ ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$) が生成される。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.14)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.15)$$

ここで生成された高いエネルギーを持ったミューオンは、大気中ではほとんど相互作用を起こさない。さらに、相対論的効果で粒子の寿命が伸び、高確率で地上まで達する。そのため、ミューオンは地上での全ての荷電粒子の 80% を占め、2 次粒子中で最大の割合になる。ミューオンが稀に崩壊すると、電子と陽電子とニュートリノ成分になる。

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.16)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.17)$$

μ^\pm の崩壊によって生成された電子・陽電子からも同様に γ 線が放出される。

このように、空気シャワーはある程度まで発達していき、その後、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くほど 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。したがって、空気シャ

ラーの形状を探って 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 2.8 に TA 実験ハイブリッド観測によって得られた平均 X_{\max} のエネルギー変化を示す。

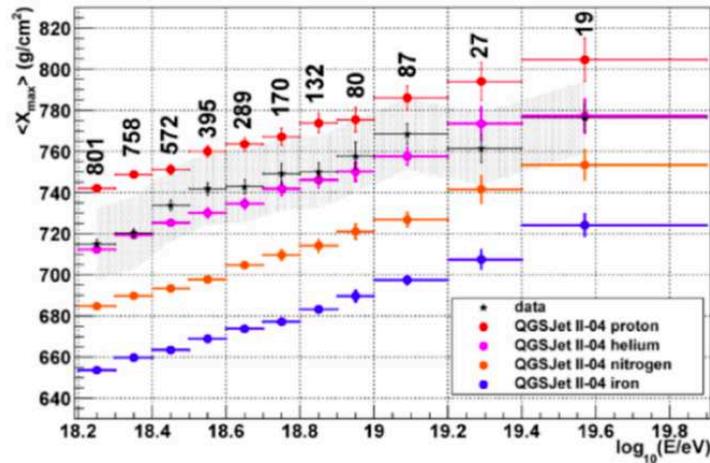


図 2.8 TA 実験ハイブリッド観測によって得られた平均 X_{\max} のエネルギー変化 [11]. 各点の上に表示されている数字は、そのデータ点に寄与した観測イベント数である。灰色の帯はこの解析での系統誤差範囲を示している。

2.3 起源モデル

極高エネルギー宇宙線の起源としてはいくつかの候補が考えられている。それらはボトムアップモデルとトップダウンモデルという種類に分けられる。ボトムアップモデルとは、フェルミ加速によって、低いエネルギーの宇宙線をより高いエネルギーへと加速するモデルのことである。実際の候補天体としては、中性子星、活動銀河核、電磁ロープ、ガンマ線バースト、銀河団などが挙げられている。一方で、トップダウンモデルとは、より高エネルギーの宇宙線が現在のエネルギーの宇宙線として観測されるというような、素粒子物理の標準的な理論を越えた新しい物理に基づくモデルや、未知の超高エネルギー天体现象に基づくモデルのことである。実際の候補天体としては、宇宙紐や超重粒子の崩壊、Z バースト模型、相対論の破れなどが挙げられている。

第3章

宇宙線観測実験

宇宙線はこれまで様々な実験で観測されてきた。それらは、気球や衛星などで一次宇宙線を直接観測する実験や地上で空気シャワーを観測し、宇宙線を間接的に観測する実験がある。その中でも、極高エネルギー宇宙線のような高エネルギー ($E > 10^{12}$ eV) の宇宙線は到来頻度が小さい。そのため、大気圏外での直接観測は現実的ではなく、地上で空気シャワーの二次粒子を地上で観測、再構成を行うのが現実的である。

そこで、本章で、過去と現在の超高エネルギー宇宙線観測実験について述べる。

3.1 過去の宇宙線観測実験

本節では、過去に行われた超高エネルギー宇宙線の観測実験の「AGASA」と「HiRes」について述べる。

3.1.1 AGASA

AGASA(Akeno Giant Air Shower Array) は、山梨県北杜市明野町, 須玉町, 高根町, 長坂町 大泉町と韮崎市にまたがる高原に設置された広域空気シャワー観測装置である [12]。観測面積は約 100 km^2 である。面積 2.2 m^2 のプラスチックシンチレータを約 1 km 間隔で 111 台設置している。1990 年から 13 年間極高エネルギー宇宙線の宇宙線の観測を行った。その結果, GZK カットオフが存在する可能性を主張した。

GZK カットオフとは、宇宙マイクロ波背景 (CMB) 光子と超高エネルギー陽子宇宙線が衝突の際にパイオン (π^0, π^\pm) の生成でエネルギーを損失することによって起こる理論的限

界の事である.

3.1.2 HiRes

HiRes(High Resolution Fly's Eye) は, アメリカ・ユタ州で行われていた超高エネルギー宇宙線観測実験である. この実験では, 大気蛍光望遠鏡 (大気蛍光望遠鏡については, Telescope Array で述べる.) を用いて空気シャワーを撮像することで宇宙線を観測する実験である [30]. 1997年から2006年までの9年間月のない晴れた夜に運用された. HiRes は, HiRes-I と HiRes-II がある. HiRes-I は, 21 の望遠鏡ユニットをもち, 1997年から2006年まで運用された. HiRes-II は, HiRes-I から 12.6 k 離れた場所に2倍のユニットをもち, 2000年から2006年まで運用された.

3.2 現在の宇宙線観測実験

AGASA 実験と HiRes 実験で発表された結果には, GZK カットオフに関する食い違いがあった. AGASA 実験では, GZK カットオフエネルギーを上回る 10^{20} eV の宇宙線を 11 イベント観測された. HiRes 実験では, GZK カットオフと矛盾しない結果が出た [14]. 図 3.1 に TA 実験ハイブリッド観測によって得られた平均 X_{\max} のエネルギー変化を示す. 縦軸は一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの3乗をかけたもの, 横軸はエネルギーの対数で表している. 青三角は AGASA 実験, 赤四角は HiRes-I, 黒丸は HiRes-II のエネルギースペクトルを表している. HiRes の $10^{19.8}$ eV 以上のスペクトルの落ち込みは GZK カットオフあり, $10^{18.6}$ eV の落ち込みは「Ankle」である. 図 3.1 より, AGASA 実験のエネルギースペクトルは, $10^{19.7}$ eV 付近の GZK カットオフを超えても到来頻度が減っていない. しかし, HiRes 実験のエネルギースペクトルは, GZK カットオフ付近で到来頻度が減っている. 以上より, この2実験は矛盾した観測結果を示している. だが, AGASA のエネルギー決定精度は 18%, HiRes は, 25% のため, GZK カットオフの存否についてはどちらも決定的な結果は示されていない.

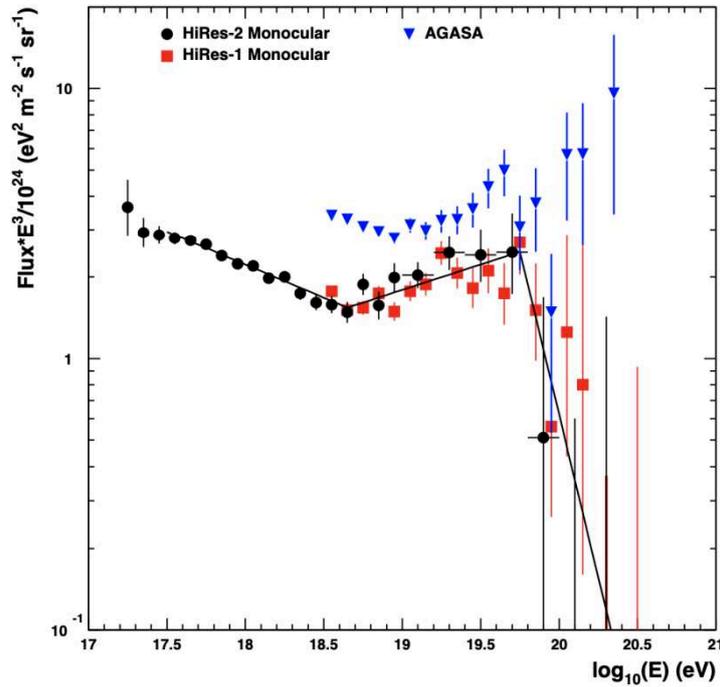


図 3.1 HiRes 実験 (モノ解析) と AGASA 実験のエネルギースペクトル [8]. 縦軸は一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの 3 乗をかけたもの, 横軸はエネルギーの対数で表している. 青三角は AGASA 実験, 赤四角は HiRes-I, 黒丸は HiRes-II のエネルギースペクトルを表している. HiRes の $10^{19.8}$ eV 以上のスペクトルの落ち込みは GZK カットオフあり, $10^{18.6}$ eV の落ち込みは「Ankle」である.

そこで, 現在, エネルギー決定精度の向上や大統計データの解析を目的とする超高エネルギー宇宙線の観測実験が行われている. その実験では, 2 種類の検出器を用いたハイブリッド観測が行われている. なぜなら, 両検出器が精度よく観測できる項目が異なるためである. そのため, 単一検出器を用いて観測した場合より, 精度よく宇宙線の情報を得ることが出来る.

本節では, 北半球で行われている Telescope Array 実験と南半球で行われている Pierre Auger Observatory について述べる.

3.2.1 Telescope Array

Telescope Array 実験は, 日米韓露白共同のもとアメリカ・ユタ州で行われている超高エネルギー宇宙線観測実験である. この実験は, 超高エネルギー宇宙線の起源を探る手がかりを

得ることを目指している。2008年から観測が始まり、現在も行われている。観測面積は、約700 km²である。設置場所は、平均標高1400の広大な盆地状砂漠地帯である。そこは、人工光が少なく、晴天率も高めで湿度も低いいため、大気蛍光望遠鏡の観測に適している。さらに、検出器や施設を結ぶ長距離無線にも都合が良い場所である。そこに、507台の地表粒子検出器(SD; Surface Detector, 次項で述べる)を1.2km間隔で設置している。その周囲に3ステーション38基(1ステーション12または14)の大気蛍光望遠鏡(FD; Surface Detector, 次々項で述べる)の2種類の検出器を用いて超高エネルギー宇宙線の観測を行っている。

図3.2にTA実験サイトの検出器の配置図を示す。四角が地表粒子検出器(SD)、星が大気蛍光望遠鏡(FD)を表している。一番北のFDはMiddle Drum(MD)、南東のFDはBlack Rock Mesa(BR)、南西のFDはLong Ridge(LR)と呼ばれている。図3.2のように、SDとFDを配置することで、FDとSDのハイブリッド観測を実現している。さらに、TAサイトの中心位置にはCentral Laser Facility(CLF)、BRのFDステーションにはLight Detection And Ranging(LIDAR)を設置している。これにより、大気透明度を測定している。そして、実験サイトの3ヶ所にコミュニケーションタワーを設置し、SDやFDの無線通信を実現している。

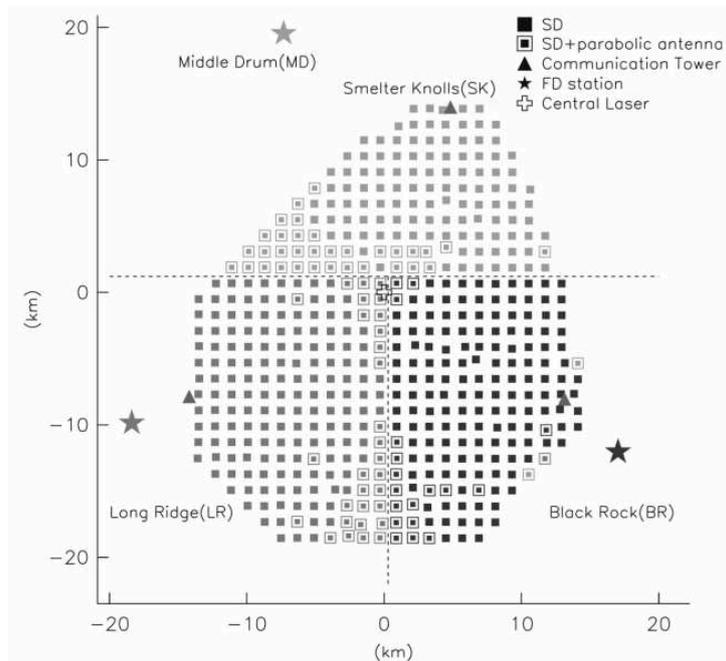


図 3.2 TA 実験サイトの検出器の配置図. 四角が地表粒子検出器 (SD), 星が大気蛍光望遠鏡 (FD) を表している. , 一番北の FD は Middle Drum(MD), 南東の FD は Black Rock Mesa(BR), 南西の FD は Long Ridge(LR) と呼ばれている.

TA 実験では, SD と FD で同時に同イベントの観測を行うことで SD・FD の系統誤差の見積もりや両検出器の情報を利用することでより高い精度でエネルギーや到来方向を決定すること出来る. 図 3.3 に TA 実験におけるハイブリッド観測の概要図を示す.

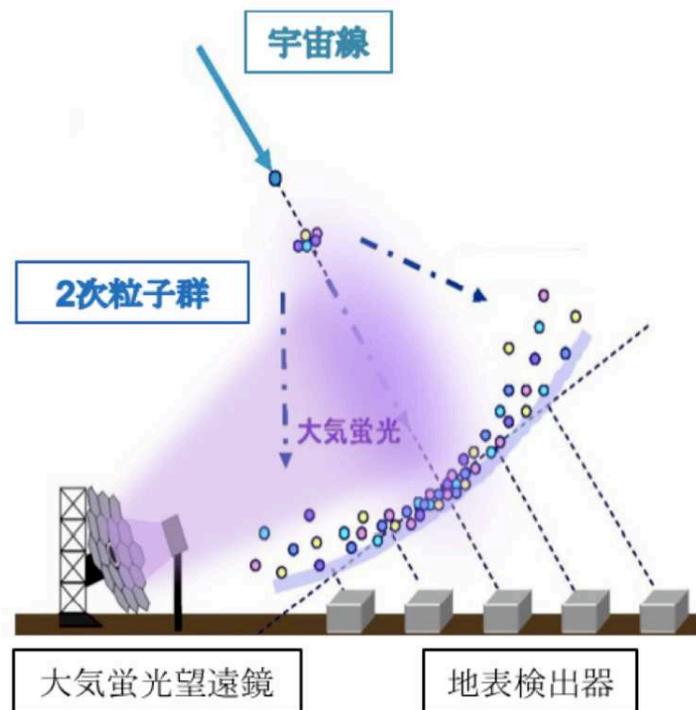


図 3.3 TA 実験におけるハイブリッド観測の概要図

3.2.2 地表粒子検出器 (SD)

地表粒子検出器 (SD ; Surface Detector) は、地球に到来した一次宇宙線と大気が相互作用することで生成された二次宇宙線を地表で直接観測する装置である。地表に多数の地表粒子検出器を配置し、観測を行う。図 3.4 に TA 実験で用いられている SD の外観を示す。



図 3.4 TA 実験で用いられている SD の外観

地表粒子検出器は内部にプラスチックシンチレータが用いられている。プラスチックシンチレータに空気シャワーの二次粒子が通過すると、シンチレーション光を発生させる。そのシンチレーション光を光電子増倍管で測定するシンチレーション光は、プラスチックシンチレータを通過した粒子数に応じて強くなる。従って、観測したシンチレーション光の光量から粒子数を推定できる。そして、地表に降り注ぐ空気シャワーの二次粒子を検出器でサンプリングし、測定した粒子数とシミュレーション結果を比較することで空気シャワーのエネルギーを推定する。また、空気シャワーはシャワー軸に対して面状に発達する。そのため、空気シャワーの軸が傾くと面上の粒子が地表に到達する時間に差が生じる。この時間差を用いて宇宙線の到来方向を推定する。

プラスチックシンチレータは微量のタリウムを含むヨウ化ナトリウム $\text{NaI}(\text{Tl})$ からなる結晶でできている。大きさは、 $100\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ である。このプラスチックシンチレータを 4 枚ずつ 2 層に重ねている。そうすることで、上下層のシンチレータのコインシデンスを取ることによって、地表からの環境放射線などのノイズを除去し二次宇宙線イベントとを区別することが出来る。そして、S/N 比の高いデータを取得する。これを 1 台に 2 組設置している。

図 3.5 に TA 実験で用いられている SD の内部構造を示す。プラスチックシンチレータの

上下層ごとに反射率 90% ほどのタイベックシートで覆うことで、シンチレーション光を効率よく検出することが出来る。さらに、上下層を厚さ 1 mm のステンレス板で仕切り、それらをブラックシートでシンチレータ全体を覆うことで、光漏れを防いでいる。また、シンチレータ上に 20 mm 間隔で波長変換ファイバ (WLSF) を張っている。シンチレータには WLSF を張るための溝が彫られており、そこに WLSF が浮かないようにテープで貼っている。それにより、シンチレータの発光を効率よく集めている。WLSF は直径 1 mm のものを使用し、シンチレータの各層ごとに集光させる。そして、光電子増倍管 (PMT) で検出する。例えば、シンチレータに γ 線が入射するとする。その場合 NaI(Tl) が γ 線のエネルギーを受け励起状態になる。その後、基底状態に戻る際に出るシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) で検出する。

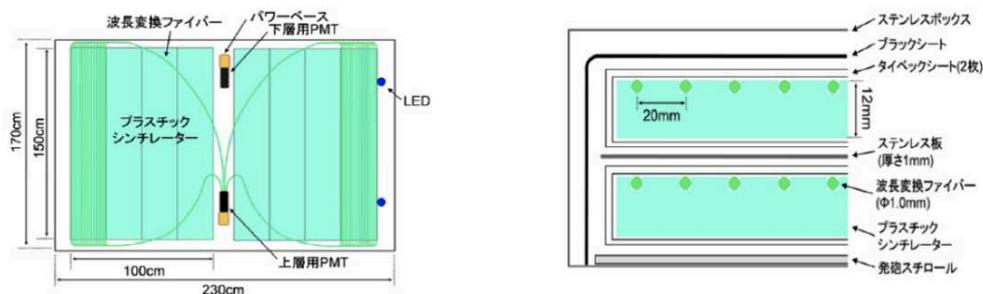


図 3.5 TA 実験で用いられている SD の内部構造 [8].

地表検出器は、検出器 1 台のコストが低く自動で観測できる。また、天候に左右されることなく、昼夜問わず観測を行えるためほぼ 100% の稼働率を維持することができる。さらに、TA 実験の地表粒子検出器は電力を太陽光発電で賄っているため、完全自動・自立で宇宙線観測が行われている。

■**光電子増倍管 (PMT)** 光電子増倍管 (PMT ; Photo Multiplier Tube) は、入射する光子を電気信号に変換、増幅することで微弱な光子を電気信号として出力することのできる器具のことである。図 3.6 に光電子増倍管の内部構造を示す。

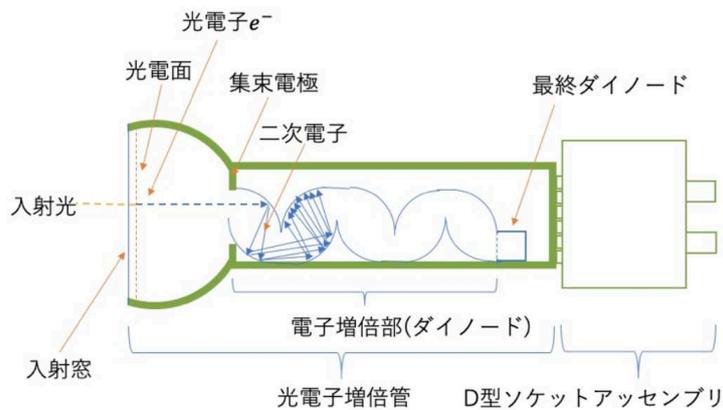


図 3.6 光電子増倍管の原理の内部構造 [15].

以下に光電子増倍管の原理を示す.

1. 入射する光子が光電面で光電効果により光電子に変換する.
2. 光電子が集束電極に印加された電圧によって生じる電圧差によって加速される.
3. 加速された光電子が第 1 大ノードに衝突し光電効果によって大量の二次電子を発生させる.
4. 二次電子が隣り合うダイノードの電位差により加速されながらダイノードを通過するたび増倍されていく.
5. これをダイノードの段数分繰り返して最終的に 100 万倍以上に増幅される.

3.2.3 大気蛍光望遠鏡 (FD)

大気蛍光望遠鏡 (FD; Fluorescence Detector) は、空気シャワーによる大気蛍光を球面鏡で集光し、PMT カメラで撮像して観測する検出器である。一次宇宙線が大気と相互作用し、空気シャワーを生成する。その空気シャワー中の荷電粒子と大気中の窒素が励起脱励起を行い、紫外光領域の波長を持つ蛍光を放出する。この蛍光を FD の球面鏡で集光し、PMT カメラで撮像して空気シャワーを間接的に観測する。図 3.7, 図 3.8 に TA 実験で用いられている FD(以下, TAFD とする) とその全体図を示す。大気蛍光望遠鏡は、集光部である巨大な反射鏡と検出部である PMT カメラで構成されている。PMT カメラは、 16×16 の PMT256 本からなるカメラである。各 PMT の光電面上には BG3 フィルタが取り付けら

れている。これは、紫外光透過フィルタで大気蛍光の波長域が 300–400 nm のため、これ以外の波長域の光を通さないために取り付けられている。また、BR, LR ステーションに設置されている FD の巨大な反射鏡は、TA 実験のために新たに設計されたもので、六角形のセグメントミラー 18 枚で構成された口径 3.3 の合成鏡である。セグメントミラーは、対辺間隔 660 mm 曲率半径 6.067 m である。これらを図 3.8 のように、FD は上下に 2 段設置する。これを 1 ステーションあたり 6 セット設置している。そのため、各ステーションの視野は方位角が 108 度、仰角 3–33 deg である。



図 3.7 TA 実験で用いられている FD

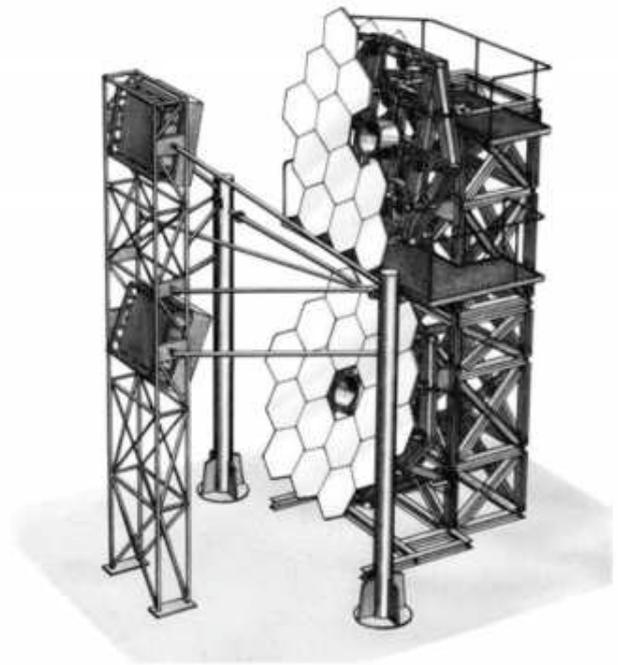


図 3.8 FD の全体図

図 3.9 に TA 験で用いられている大気蛍光望遠鏡ステーションを示す。



図 3.9 FD ステーション

FD は、あらかじめ大気蛍光量とエネルギー損失の関係を測定することで、観測光量を積分するだけで空気シャワー中の電磁カスケードのエネルギーを精度よく決定できる。また、現在稼働している大気蛍光望遠鏡の受光部は光電子増倍管を配列させてできている。望遠鏡視野の中心軸に対する光源の開き角に応じて、受光点と受光面中心の距離が変化する。そのため、どの光電子増倍管で受光したかによって光源の二次元的な位置を決定できる。つまり、大気中の任意の位置で発生した蛍光量を測定することができるため、大気中の空気シャワーの発達の様子を観測できる。よって、宇宙線の質量組成を推定できる。ただし、1つの望遠鏡で奥行き方向の光源の位置を決定することは難しい。従って、大気蛍光望遠鏡を用いて空気シャワーの到来方向や落下地点を決定することは難しい。それゆえ、大気蛍光望遠鏡を用いて空気シャワーの到来方向や落下地点を精度よく決定するために2台以上の望遠鏡を用いたステレオ観測が望ましい。そこで、TA 実験では、MD, BR, LR の3ヶ所にあるFDでステレオ解析を行っている。

極高エネルギー宇宙線の起源解明にとって質量組成の推定は不可欠なことである。そのため、大気蛍光望遠鏡は宇宙線観測において非常に有用である。しかし、光測定に光電子増倍管を用いるため、月のない晴れた夜間しか観測できない。そのため、稼働率は地表検出器の10%

ほどである。さらに,1台のコストが非常に高く,装置の安全上遠隔地から手動で行われているため,人件費などの運用コストも高いという欠点がある。

3.2.4 Pierre Auger Observatory

Pierre Auger Observatory は,アルゼンチンで行われている南半球最大の超高エネルギー宇宙線観測実験である。観測面積は約 3000km^2 である。1600基の水タンク検出器を1.5kmおきに三角格子状に設置している。そして,地表アレイを囲うように大気蛍光望遠鏡を4サイト24台設置されている。

現在 Telescope Array と Pierre Auger グループでエネルギースペクトルのワーキンググループが結成されており,スペクトルの折れ曲がり構造の原因究明等が進められている。

第4章

フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡 (CRAFFT)

第2章で述べたように、極高エネルギー宇宙線の起源の解明には、宇宙線の「エネルギースペクトル」、「質量組成」、「到来方向分布」の測定が必要である。その中でも、宇宙線の質量組成の測定には、大気蛍光望遠鏡 (FD) が有用である。また、超高エネルギー宇宙線などのより高いエネルギーの宇宙線は到来頻度が極めて低い。さらに、FD は、月のない晴れた夜間しか観測できないため、稼働率は SD の 10% ほどである。そのため、TA 実験が始まって 10 年以上経つが、未だ観測統計量が足りていない。したがって、観測統計量を増やすために観測領域を拡大していく必要がある。しかし、現行の FD は 1 台のコストが非常に高く、大量に設置して観測領域を拡大するのは難しい。加えて、望遠鏡が高コストであるため安全面を考慮して完全自動観測は行えず人件費も必要である。よって、現行の大気蛍光望遠鏡を用いての観測領域の拡大は現実的ではない。そこで、我々は、低コストかつ完全自動で宇宙線を観測できる大気蛍光望遠鏡 Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope (CRAFFT) の研究・開発を行っている。この章では、私たちが研究・開発しているフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡について説明する。

4.1 CRAFFT-prototype の概要

CRAFFT-prototype(以下、CRAFTT とする) は低コスト化を実現した FD である。低コストで作成するために全て既製品によって構成されており、シンプルな構造にしている。建

設コストは、TAFD が 1 台およそ 2000 万円程度に対して、望遠鏡部とエレクトロニクス部を合わせても 1 台 100 万円程度である。さらに、TAFD は建屋を必要とするが、CRAFFT は建屋を必要としない。加えてこれらの部品は全て人が持てる程度の重さであり、市販のアルミフレームは組み付けが容易である。それゆえ、2, 3 人で部品の輸送や望遠鏡を簡単に組み立てられることができ、運送費や建屋分の建設コストも節約できる。以上より、低コスト化を実現出来ていると言える。

次に、CRAFFT の構造について述べる。図 4.1 と図 4.2 に CRAFFT の外観と内部構造を示す。また、表 4.1 に CRAFFT の構成部品一覧を示す。CRAFFT の前面には大きさ $1.05 \times 1.4 \text{ m}$ の市販のフレネルレンズを設置してあり、このレンズで大気蛍光を集光する。フレネルレンズとは、焦点がレンズの内側に来るような短い焦点距離のレンズをアクリル樹脂などの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軽量に再現したものである。このフレネルレンズを用いることで、望遠鏡全体を小さく保つことができる。なぜなら、解像度は落ちるが、大型のレンズでありながら軽量かつ焦点距離を短することができるためである。その焦点面には紫外光透過フィルタを設置している。大気蛍光は非常に微弱な光である。そのため、観測時は大気蛍光以外にも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を設置することにより、大気蛍光である紫外光以外の光を紫外光透過フィルタで除去し、ノイズを抑制する効果がある。その後ろに光検出器として直径 203 mm の PMT を 1 つ設置している。この PMT で入射光を電気信号に変換する。PMT は微弱な光にも反応して信号を出力する高感度光素子によって宇宙線空気シャワーから発せられるわずかな大気蛍光を検出することができる。また、PMT の前面に空間フィルタを挟むことで CRAFFT の視野角を 8 deg に制限している。CRAFFT は、これら全体を外枠である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ってできている。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、建屋を使用しない CRAFFT に適している。

さらに、望遠鏡の外に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、出力される信号は極めて小さいためそれ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 Raspberry Pi、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。

以上より、全て既製品によってシンプルな構造にすることで、低コスト化を実現している。今後は、現在研究中の CRAFFT の最適化や自動観測システムの開発などのアップグレード

が必要である。



図 4.1 CRAFFT の外観.

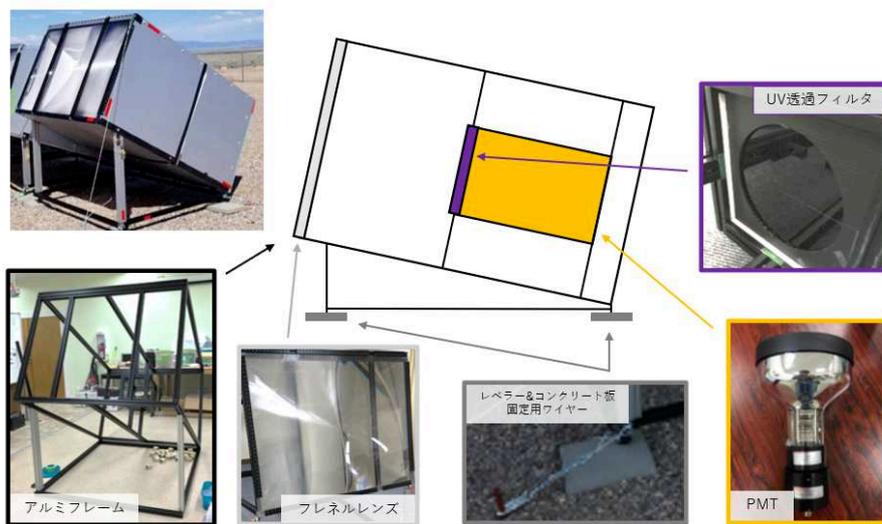


図 4.2 CRAFFT の内部構成.

表 4.1 CRAFFT の構成部品一覧

構成要素	品名	仕様	コスト [万円]
フレネルレンズ	NTKJ, F1200-B	1.4 m ² , f=1.2 m	4
紫外光透過フィルタ	O. M. C., UL-330	90%@300-360 nm	32
光電子増倍管	浜松フォトニクス, R5912	8 inch	20.5
電圧アンプ	Lecroy, 612AM	6 ch	10
FADC ボード	特殊電子回路, Cosmo-Z	80 MHz, 12 bit	3.1
高圧電源	CAEN, N1470AR	2ch	16.5
アルミフレーム	ユキ技研		13.4
外装・光学系保護			3
合計			102.5

4.2 現行の大気蛍光望遠鏡との比較

TAFD と CRAFFT の性能を比較する. 表 4.2 に TAFD と CRAFFT のスペック比較を示す.

表 4.2 TAFD と CRAFFT のスペック比較 [31]

	TAFD	CRAFFT
集光部	複合放物面鏡: 有効面積 6.8 m ²	フレネルレンズ: 有効面積 1.0 m ²
受光部	60 mm 光電子増倍管: 256 本	203 mm 光電子増倍管: 1 本
骨格	鉄骨	アルミフレーム
建屋	あり	なし
建設コスト	約 2000 円	約 100 万円

TAFD は, 口径 3.3 m の複合球面鏡で大気蛍光を集光する反射型大気蛍光望遠鏡である. 複合球面鏡は, 正六角形鏡を 18 枚組み合わせて出来ている. 対して, CRAFFT は口径 1 m の大型フレネルレンズで大気蛍光を集光するでフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡である. 集光部の有効面積は, TAFD が 6.8m², CRAFFT が 1.4m² である. そのため, CRAFFT の集光

量は TAFD の約 20% になる。しかし、反射系で望遠鏡を組む場合、受光部が鏡の前に設置されるため、受光部の一部が隠れてしまう。よって、単位面積あたりの集光効率は CRAFFT のほうが良い。しかし、全体の集光率は口径の 2 乗に比例するため、CRAFFT は TAFD の 10% ほどである。

また、TAFD の受光部は、 1 m^2 の PMT カメラで出来ている。PMT カメラは、感面のサイズが 60 mm の PMT を 256 本配置し、1 本の PMT に $1^\circ \times 1^\circ$ の視野角を割り当てている。空気シャワーの発達に応じて光の集光点が受光部にトラックを描くように移動する。そのため、空気シャワーの左右方向の傾きを測定できる。さらに、離れた地点にある 2 台以上の FD で空気シャワーの観測ができれば、受光部のトラック情報のみで空気シャワーの到来方向を決定できる。傾きの測定精度は PMT が多いほど良くなるので、2 箇所 の TAFD で同空気シャワーが観測されれば 1 deg 以下の精度で空気シャワーの到来方向を決定できる。つまり、TAFD は、空間分解能が高く、単体の FD で宇宙線空気シャワーを幾何学的に解析することが出来る。対して、CRAFFT の受光部は感面のサイズ 203 mm の PMT を 1 本配置している。そのため、空気シャワーの発達による光量の変化は測定できるが、単体での到来方向測定は難しい。つまり、CRAFFT は空間分解能が低く、単体での宇宙線空気シャワーを幾何学的に解析することは難しい。しかし、CRAFFT の台数を増やし、2 箇所以上のステレオ観測を行うことでこのデメリットをカバーできると考えている。

さらに、TAFD は FD を支えるために鉄骨を用いている。対して、CRAFFT は軽量のフレネルレンズを集光部に用いているため、汎用のアルミフレームを用いている。そして、TAFD の 1 台あたりのコストはおよそ 2000 万円で大型の建屋に 12 台設置して 1 つのステーションとして観測を行っている。対して、CRAFFT 望遠鏡の 1 台あたりのコストはおよそ 100 万円で建屋を使用せず単体で設置して観測を行う予定である。そのため、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

4.3 CRAFFT-prototype の宇宙線空気シャワー観測性能

CRAFFT が作成されたことにより、FD の低コスト化を実現することが出来た。しかし、prototype の宇宙線空気シャワー観測性能について試験されていない。そこで、2017 年 11 月にアメリカ *cdot* 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た。それらを 1 日で設置し、宇宙線観測試験が行われた。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CRAFFTとTAFDの視野が重なるように設置している。それにより、TAFD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CRAFFTとTAFD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認している。図4.3に実際にCRAFFTが観測できた宇宙線の信号波形とTAFDとCRAFFTの視野を重ねたものの1例を示す。実際にCRAFFTが観測できた宇宙線の信号波形の縦軸はADC count、横軸は時間を表している。色は観測したCRAFFTを表している。ADC countは光電子数のことである。TAFDとCRAFFTの視野を重ねたものの縦軸は仰角、横軸は方位角を表している。四角形の枠は12台のTAFDの視野、赤、青、黒、黄色の4つの円は、4台のCRAFFTの視野をそれぞれ表している。図4.3より、赤と黒のCRAFFTの視野を宇宙線空気シャワーが通過した(右図)時、赤と黒の信号が順番に立ち上がっている(左図)この宇宙線はTAFDによってエネルギーが $10^{17.7}$ eVほどで両望遠鏡から距離3.6 kmの地点に降ったことが確認された。CRAFFTは1ヶ月間の観測でこのイベントを含めて10イベントの宇宙線を観測できた。これによりCRAFFTで宇宙線空気シャワーの観測できるということが確認された。

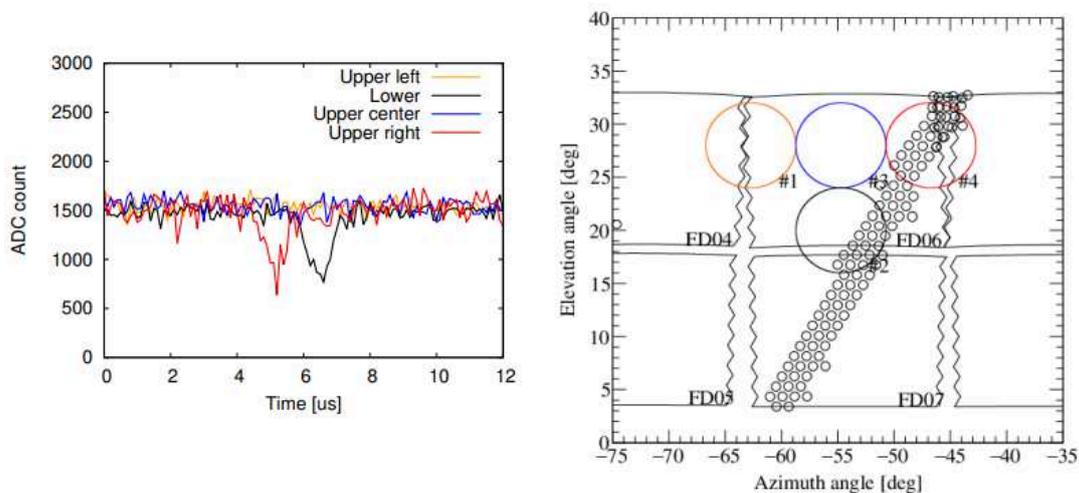


図 4.3 実際に CRAFFT が観測できた宇宙線の信号波形 (右) と TAFD のイベントディスプレイに CRAFFT の視野を重ねたもの (右) の 1 例 [16]. 左図の縦軸は ADC count, 横軸は時間を表している。色は観測した CRAFFT を表している。ADC count は光電子数のことである。右図の縦軸は仰角, 横軸は方位角を表している。四角形の枠は 12 台の TAFD の視野, 赤, 青, 黒, 黄色の 4 つの円は, 4 台の CRAFFT の視野をそれぞれ表している。

4.4 CRAFFT 実験の将来計画

CRAFFT 実験は、極高エネルギー宇宙線の観測統計量を増やすために、観測領域を 40 万 km² に拡大し、宇宙線観測を行う実験を目指している。そのために、望遠鏡の開発計画を 3 段階に分けて開発を進めている。フェーズ 1 は検出器概念の確立、フェーズ 2 は観測方法の確立、フェーズ 3 は大規模観測である。

フェーズ 1 では、フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の検出器概念の確立を行う。ここでは、主に 2 つの目標をクリアしなければならない。それは、作成の低コスト化と完全自動観測化である。その中でも、作成の低コスト化は実現されている。低コストのフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡は、2017 年に行われた宇宙線の試験観測によって、既に宇宙線の検出を行えることを確認している。次に、完全自動観測化であるが、2020 年度信州大卒の中村 雄也氏によって、完全自律観測システムの開発がされた [17]。これは、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ている。完全自律観測システムの完全自律運用試験は既に行われ、信州大で 2020 年 3 月 15 日からこれまでに 6 ヶ月以上の長期間の稼働が確認されている。また、2021 年度信州大卒の窪田 悠人氏によって、検出部構成の最適化の検討も行われた [18]。これにより、検出部の構成は、解析に必要な天頂角の決定精度 3 deg を基準とし、直径 13 cm の PMT を 12 本 4×3 の長形状に配置した仕様に決定した。2022 年夏に、検出部を最適化した CRAFFT に完全自律観測システムを導入し、アメリカ・ユタ州にて自律運用試験を行う予定である。以上より、2022 年夏でフェーズ 1 のフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の検出器概念の確立は達成される。

フェーズ 2 では、観測方法の確立を行う。ここでは、主に 4 つの目標をクリアしなければならない。それは、TA サイトに 6+6 (+6) の CRAFFT を配備、ステレオによる宇宙線空気シャワーの観測試験、ネットワークのテスト、宇宙線空気シャワーの再構成解析である。CRAFFT は単体での空間分解能が低いため、1 つの空気シャワーを 2 ヶ所以上の観測所で観測するステレオ観測を前提に開発を進めている。そのため、ステレオでの観測試験や宇宙線空気シャワーの再構成解析、各観測所をつなぐネットワークの確立などが開発項目としてあげられる。現在は、宇宙線空気シャワーの再構成解析を行うための再構成手法の開発や開発した再構成手法の決定精度や解析効率などを調査を行っている。以上より、フェーズ 2 では、観測方法の確立を行う。

フェーズ 3 では、大規模観測を行う。ここでは、目標とする 10 万 km² を超える規模で望

遠鏡を展開し, 宇宙線観測を行う. そのため, 展開を見据えて, 望遠鏡の量産化や設置方法, 複数の望遠鏡を 1 ヶ所にまとめて 360 deg 観測を行える観測所の確立が必要となる. 以上より, フェーズ 3 では, 大規模観測のための準備と CRAFFT を用いた大規模観測を行う.

以上が, CRAFFT 実験の将来計画である. 現在は, フェーズ 1 の最終段階とフェーズ 2 の準備段階に到達している. フェーズ 1 は, 検出部を最適化した CRAFFT に完全自律観測システムを導入し, アメリカ・ユタ州にて自律運用試験を行うことで, 検出器概念の確立は達成される. また, フェーズ 2 は, 宇宙線空気シャワー再構成手法の開発, 開発した再構成手法の決定精度や解析効率の調査を行っている.

第 5 章

CRAFFT Java

2017年11月のアメリカのユタ州にて, CRAFFT による宇宙線空気シャワーの検出能力は実証された [19]. これにより, CRAFFT のような非常に簡素な構造の望遠鏡であっても宇宙線空気シャワーを観測できることが証明された. 今後は望遠鏡の解析性能評価と望遠鏡再設計を繰り返し, 簡素な構成でも FD と同程度の解析性能を持つ設計に最適化する必要がある. しかし, 極高エネルギー宇宙線の到来頻度は極めて低いため, 実際の極高エネルギー宇宙線を用いた望遠鏡の性能評価は現実的ではない. そのため, CRAFFT が観測した様々な宇宙線空気シャワーの擬似データを用いた望遠鏡の性能評価が現実的である. そこで, CRAFFT が様々な宇宙線空気シャワーを観測したときの擬似データを生成検出器シミュレータが必要である.

検出器シミュレーターは, 2つのシミュレータで構成されている. それは, ”空気シャワーシミュレータ” と, ”レイトレースシミュレータ” である. 空気シャワーシミュレータは, 宇宙線空気シャワーから望遠鏡に入射する光子の光量などの情報, レイトレースシミュレータは, 望遠鏡に入射した光子が光電子増倍管で受光されるまでの振る舞いを見積もるシミュレータである. この空気シャワーシミュレータとレイトレースシミュレータを用いた検出器シミュレーションを CRAFFTjava という.

5.1 空気シャワーシミュレータ

空気シャワーシミュレータでは, 望遠鏡に対して, 落下地点 (X, Y)・到来方向 (天頂角, 方位角)・エネルギーなど任意の条件で宇宙線空気シャワーを生成することが出来る. 望遠鏡

の視野内に宇宙線空気シャワーが発生した場合、宇宙線空気シャワーから望遠鏡に入射する蛍光・チェレンコフ光の光量を大気による光量の減衰を考慮して見積もる。CRAFFTjavaの空気シャワーシミュレータは、CRAFFTに入射する光子の光量を見積もるために、現行の超高エネルギー宇宙線観測実験であるTA実験[20]で使用されているシミュレータの”TA-Java”を流用している。

5.1.1 CRAFFTjavaの空気シャワーシミュレーター

TA-Javaには空気シャワーの生成、光子の生成、大気による光子の減衰を計算する関数が準備されている。そこで、TA-Java内のTAFDオブジェクトの一部を書き換え、新たな望遠鏡オブジェクトとしてCRAFFTの構造を実装する。そうすることで、空気シャワーから望遠鏡に入射する光子の光量を見積もっている。以下に、CRAFFTjavaの空気シャワーシミュレーターが見積もる宇宙線空気シャワーから望遠鏡に入射した光子の情報について示す。

- フレネルレンズの中心を基準とした、フレネルレンズに光子が入射した位置
- フレネルレンズの法線ベクトルに対する、発光点の方位角・仰角 [deg.]
- 入射光子の波長 [nm]
- 光子数 [個]
- フレネルレンズに光子が入射した時間 [ns]
- 北を 0° とした光子発光点の方位角・仰角 [deg.]
- 光子が入射した望遠鏡の番号
- 光子の起源の種類

望遠鏡の設置座標・視野方向

シミュレータ内で2017年の試験宇宙線観測を再現するために、望遠鏡の設置座標・視野方向を実際のCRAFFTと同様にすることがある。しかし、CRAFFTの設置座標は正確に測量していない。そのため、航空写真から大まかな座標を推定している。図5.1にCRAFFTの設置座標を調査するために使用した航空写真を示す。縦軸は南北方向、横軸は東西方向である。紫はBlack RockにあるTA-FDの位置、緑はBlack RockにあるTA-FDを円周とした際を中心、水色はCRAFFTの位置である。

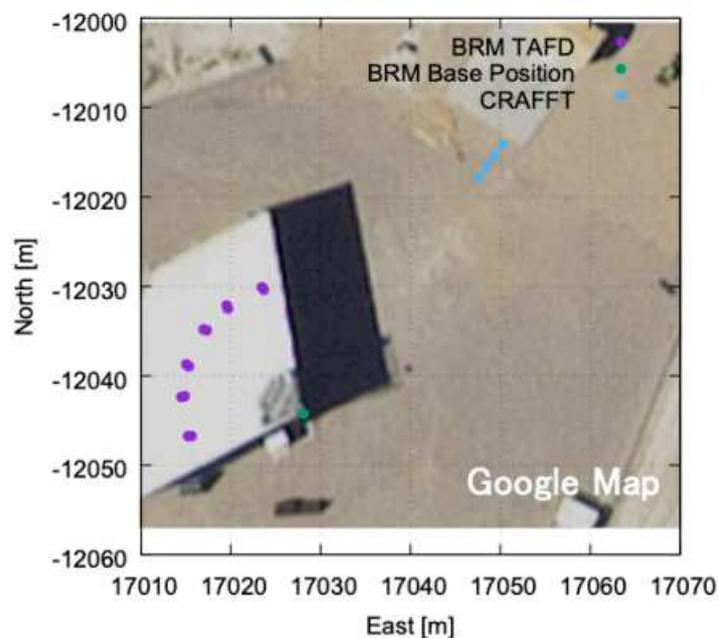


図 5.1 CRAFFT の設置座標を調査するために使用した航空写真 [19]. 縦軸は南北方向, 横軸は東西方向である. 紫は Black Rock にある TA-FD の位置, 緑は Black Rock にある TA-FD を円周とした際の中心, 水色は CRAFFT の位置である.

また, CRAFFT の方位角・仰角は, CRAFFT 望遠鏡建設時に目標とした理想的な値を用いている. さらに, CRAFFT の視野角は設計上 $\pm 4^\circ$ の円形だが, 空気シャワーシミュレータではマージンを考慮して $\pm 5^\circ$ の正方形としている. 表 5.1 に図 5.1 を用いて調査した 4 台の CRAFFT の具体的な相対座標と視野方向を示す.

表 5.1 CRAFFTJava で設定している 4 台の CRAFFT 望遠鏡の座標と視野情報. X・Y 座標は, TA-FD (BRFD, Camera#0) の鏡中心の X・Y 座標に対するフレネルレンズ中心の相対座標, Z 座標は, 地表からの高さ, 方位角は, 北を 0° とした時計回りの角度. 仰角は, 水平を 0° とした角度である. [19]

望遠鏡番号	X 座標 [cm]	Y 座標 [cm]	Z 座標 [cm]	方位角 [deg.]	仰角 [deg.]
1	3314.8	2453.9	140.2	-62.8	28.0
2	3401.1	2576.5	117.7	-54.8	20.0
3	3487.5	2699.1	140.2	-54.8	28.0
4	3574.0	2821.6	140.2	-46.8	28.0

5.2 レイトレースシミュレーター

空気シャワーシミュレーターによって, レンズ面に衝突する光子の情報を見積もることが出来る. しかし, レンズ面に衝突した光子は屈折する. そして, 屈折した光子の一部が光電子増倍管の感面に入射して電気信号として記録される. よって, CRAFFTJava には, レンズに入射した光子がどのように振る舞うかを見積もるシミュレーターも必要である. そのため, ROOT-Based Ray-Trancing Library for Cosmic-Ray Telescopes(ROBAST)を利用してレイトレースシミュレーターは開発されている.

5.2.1 ROOT-Based Ray-Trancing Library for Cosmic-Ray Telescopes(ROBAST)

ROBAST[21] はレイトレースを計算するための ROOT のライブラリである. ROOT[22] は図形を描画するライブラリが豊富なデータ解析ソフトウェアである. ROOT を用いると任意の空間図形でレンズを構成し, 描画することができる. そのため, あるの空間図形をレンズに見立てて, レンズに光子が衝突した際の受光・屈折・反射・吸収を見積もっている.

5.2.2 レイトレースシミュレーターの開発

レイトレースを計算するためには, レンズに当たった光が入射する可能性がある構造物を空間図形として ROBAST 上に実装する必要がある. 以下に CRAFFT の実装にあたり実装された構造物を示す.

- フレネルレンズ
- レンズたわみ防止アルミチャンネル
- アルミフレーム
- 紫外光透過フィルター
- 紫外光透過フィルター治具
- 視野角制限フィルター
- ガルバリウム鋼板
- 防水用黒シート
- ロールカーテン
- 光電子増倍感面

フレネルレンズの実装

フレネルレンズは通常のレンズに比べて薄く、通常のレンズだと焦点距離がレンズの内部にできてしまうような極めて焦点距離の短いレンズである。図 5.2 にフレネルレンズの概要を示す。CRAFFT で使用しているフレネルレンズは、フレネルレンズの溝幅（ピッチ）が 0.33 mm である。フレネルレンズを製作している日本特殊光学樹脂からピッチごとの山の角度のデータを提供してもらい、この構造を ROBAST 上で再現している。通常のレンズの厚みをなくしたフレネルレンズであれば各山の表面は曲面になっている。しかし、ピッチが 0.33 mm と細かいので、山の表面の平面と考えるとフレネルレンズの山々は円錐の一部の集合体であると考えられる。そのため、ROOT は空間図形同士の足し引きができるので、複数の円錐を組み合わせてフレネルレンズを再現している。

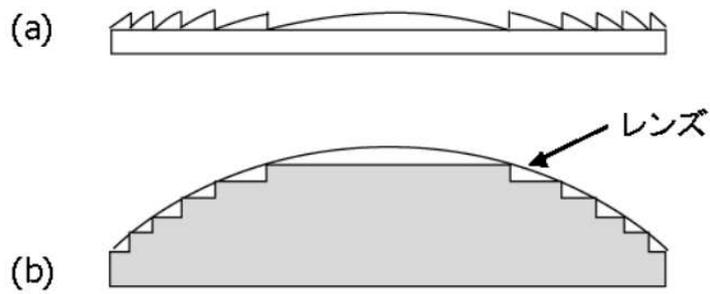


図 5.2 フレネルレンズの概要 [19]. (a) がフレネルレンズ, (b) が通常のレンズである. フレネルレンズは, (b) の灰色部分を削って厚みをなくしたレンズである.

フレネルレンズ以外の実装

フレネルレンズ以外の構造物は簡単な形をしているので, 直方体と円柱を組み合わせて実装されている. 図 5.3 に, CRAFFTjava に実装した CRAFFT の 3D モデルを示す.

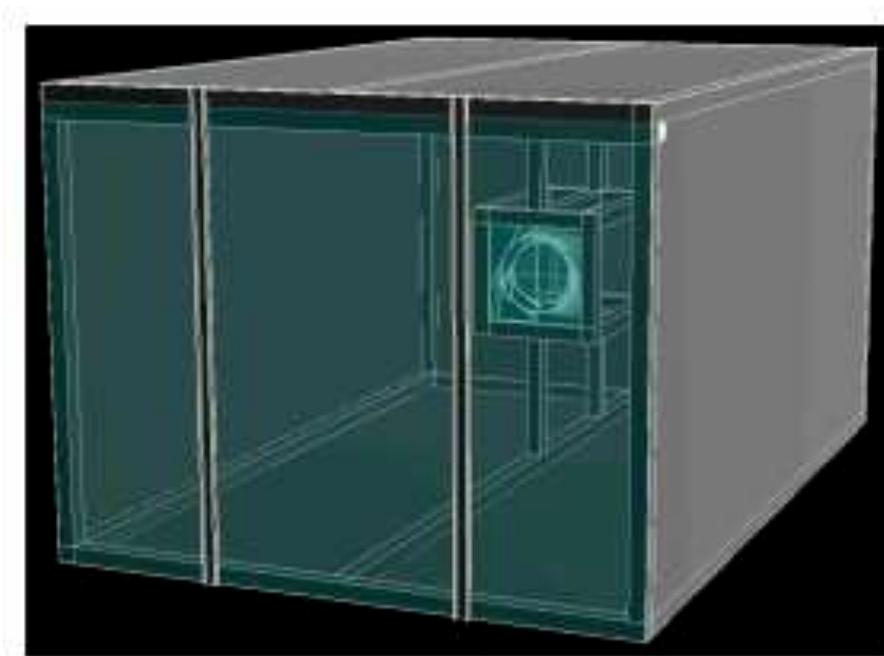


図 5.3 CRAFFT の 3D モデル [19]

ROBAST は各空間図形に受光・屈折・反射・吸収のいずれかの効果を割り当てることができる。表 5.2 に各構造物に割り当てられている効果を示す。これら全ての構造物を組み合わせて CRAFFT は実装されている。

表 5.2 CRAFFT 望遠鏡の構造物と各々の光学系の効果 [19]

構造物	効果
レンズ抑え用アルミチャンネル	吸収
アルミフレーム	吸収
紫外光透過フィルター	屈折
紫外光透過フィルター治具	吸収
視野角変更フィルター	吸収
ガルバリウム鋼板	反射
防水用黒シート	吸収
ロールカーテン	吸収
光電子増倍感面	受光

第 6 章

波形フィット法を用いた宇宙線空気シャワーの再構成

6.1 研究目的

2017年に CRAFFT の宇宙線観測能力が実証された。しかし、CRAFFT は、シンプルな構造をしているため、FD よりも低空間分解能である。そのため、FD では宇宙線空気シャワーを幾何的に観測できるが CRAFFT では観測することが出来ず FD とは異なる信号が検出される。図 6.1 は FD と CRAFFT の視野の重なりを示す。長方形のような形が FD、色付きの丸 1 つが CRAFFT それぞれ 1 台の視野、小さな黒丸は FD が宇宙線空気シャワーを観測する際に反応した PMT を表している。色は観測した CRAFFT を表している。オレンジが CRAFFT1、黒が CRAFFT2、青が CRAFFT3、赤が CRAFFT4 である。FD は複数の PMT で観測しているため、図 6.1 のように宇宙線空気シャワーの飛跡を撮像することができる。それゆえ、撮像した結果から宇宙線のエネルギーの大きさや到来方向、落下地点 (X, Y) を推定することができる。しかし、CRAFFT では 1, 本の PMT で観測しているため、宇宙線空気シャワーの飛跡を撮像することはできない。その代わりに、CRAFFT2 と CRAFFT3 の 2 本の PMT で宇宙線空気シャワーを観測する。その際、CRAFFT によって観測された宇宙線空気シャワーを図 6.2 に示す。縦軸は光電子数、横軸は時間を表している。従って、既存の再構成手法を用いることはできず、従来の手法で宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点 (X, Y) を推定することが不可能である。そこで、新たに宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点 (X, Y) を解析する手法が必要になる。

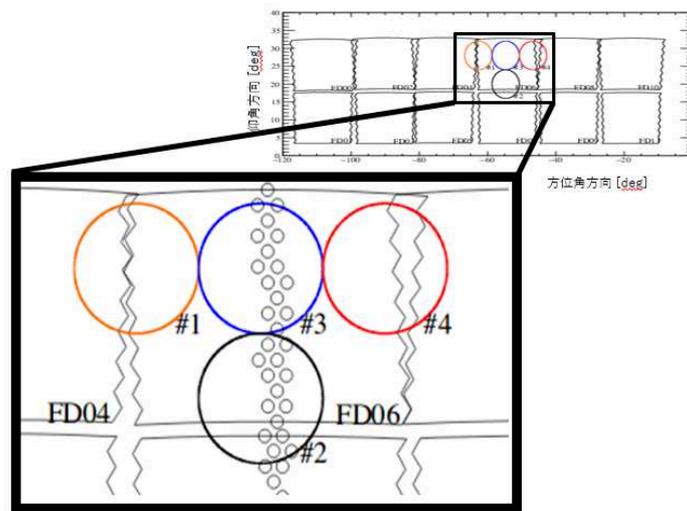


図 6.1 FD と CRAFFT の視野の重なり [23]. 長方形のような形が FD, 色付きの丸 1 つが CRAFFT それぞれ 1 台の視野, 小さな黒丸は FD が宇宙線空気シャワーを観測する際に反応した PMT を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジが CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.

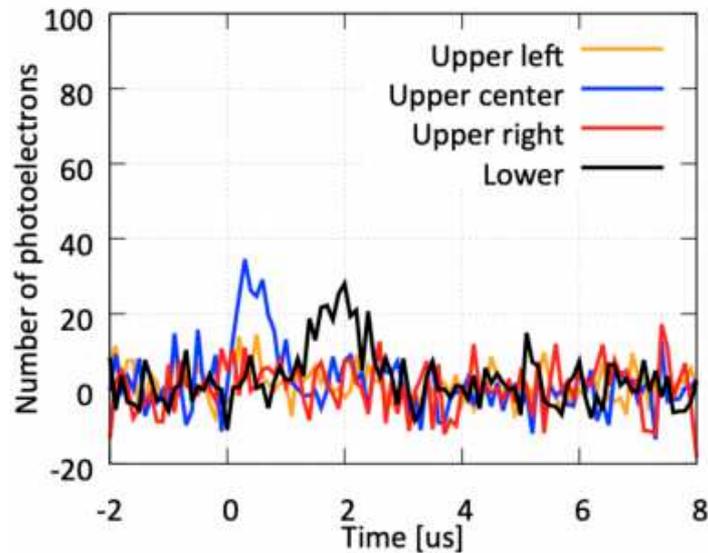


図 6.2 CRAFFT が観測したイベント [19] 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.

鍵谷らにより到来方向と落下地点を決定する解析手法を開発されてきた [27]. これについては, 6.7.1 で詳しく説明する. 私は, 宇宙線のエネルギーや宇宙線の核種を決定するために必要な決定する手法の確立と開発した解析手法の決定精度を調査を行う.

6.2 研究概要

CRAFFTjava を用いた宇宙線空気シャワー再構成手法を開発した. CRAFFT が観測した宇宙線空気シャワーの波形 (以下, 観測波形とする) は, 宇宙線のエネルギーや X_{\max} , ジオメトリなどの条件によって変化する. そこで, CRAFFTjava を用いて, 様々な条件の波形を疑似的に再現し, その疑似波形と観測波形を比較する. そして, 疑似波形と観測波形が良く一致した場合, その条件を宇宙線空気シャワーのジオメトリ, そして宇宙線のエネルギーや X_{\max} とすることができる. また, 疑似波形はジオメトリやエネルギーなどは分かっているので, 決定精度を見積もることが出来る. ここで, 一致する疑似波形を探す際に, 1つ1つ見比べて行うのは大変である. そこで, 波形フィット法を用いる. 本研究では, 波形フィット法を用いた宇宙線のエネルギー, 到来方向, 落下地点 (X, Y) を決定する手法を開発した. そし

て, 様々な条件の疑似波形と観測波形を再現した疑似波形を比較して, $\chi^2/d.o.f.$ 分布を求めた. ただし, 本研究では, 観測波形ではなく, CRAFFTjava で再現した CRAFFT が観測した疑似波形 (以下, 観測が期待される疑似波形とする) を用いた. さらに, 観測が期待される疑似波形は, X_{max} を一定の条件にすることで, 同様な空気シャワーの宇宙線になるようにした. これは, 宇宙線が空気シャワー現象を起こした際にどの程度発達するのは宇宙線のイベントによって異なる. そのため, 同様な空気シャワーの宇宙線を用いて波形フィットを行うことで, 宇宙線のエネルギー, 到来方向, 落下地点 (X, Y) の再構成が行えているのか評価しやすくしている. また, 波形フィットで再構成した際に各パラメータにおける精度を知るために, 到来方向と落下地点の解析精度の調査を行った. さらに, CRAFFT が宇宙線として判断した信号をどの程度解析が行えるのか見積もるために解析効率の調査を行った.

そのため, 本研究で用いた

CRAFFTjava では主に宇宙線のエネルギー, 天頂角, 方位角, 落下地点 (X, Y), N_{max} , X_{max} を指定してシミュレーションを行った. N_{max} は式 6.1[24], X_{max} は図 6.3 から求めた.

$$N_{max} = (1.1\text{to}1.6)E_0(\text{GeV}) \quad (6.1)$$

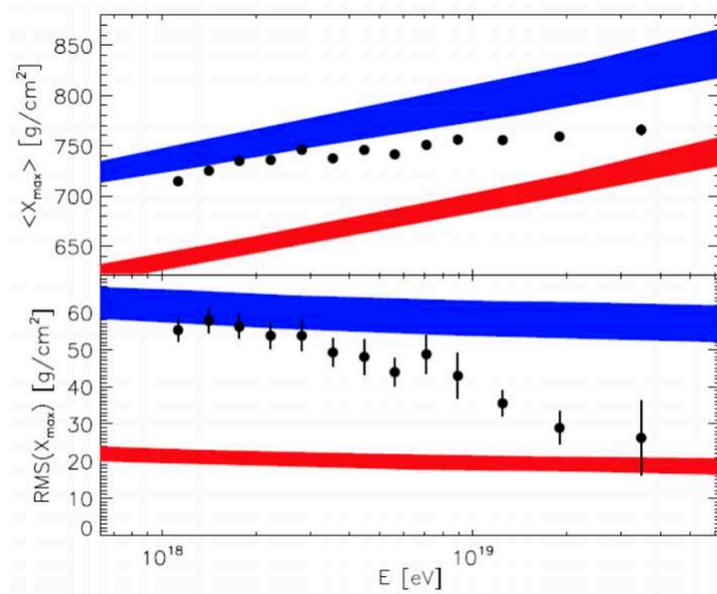


図 6.3 Auger 実験の X_{max} 分布 [25]

6.3 観測波形の違い

観測波形がジオメトリによってどのような違いがあるか CRAFFTJava で再現した疑似波形を用いて調査した。まずは,異なるエネルギーの大きさによる疑似波形の違いについて調査した。図 6.4 にジオメトリは同値でエネルギーの大きさが異なる疑似波形を示す。疑似波形は天頂角が 40 degree, 方位角が 30 degree, 落下地点 X が 9 km, 落下地点 Y が, -9 km で, エネルギーが $10^{19.5} - 10^{21.0}$ までエネルギーのべきで 0.5 ずつ変化させたイベントを光電子数の時間変化で表している。縦軸は光電子数, 横軸は時間である。この疑似波形は全て CRAFFT3 が観測した宇宙線空気シャワーを再現している。図 6.4 より, エネルギーが $10^{21.0}$ eV と $10^{20.0}$ eV の疑似波形を比較すると, エネルギーが $10^{21.0}$ eV の際に検出できる光電子数はエネルギーが $10^{20.0}$ eV の際に検出できる光電子数の約 10 倍になっている。そして, エネルギーが大きくなるにつれ検出できる光電子数が増加している。以上より, エネルギーによる波形が異なる様子が確認できた。

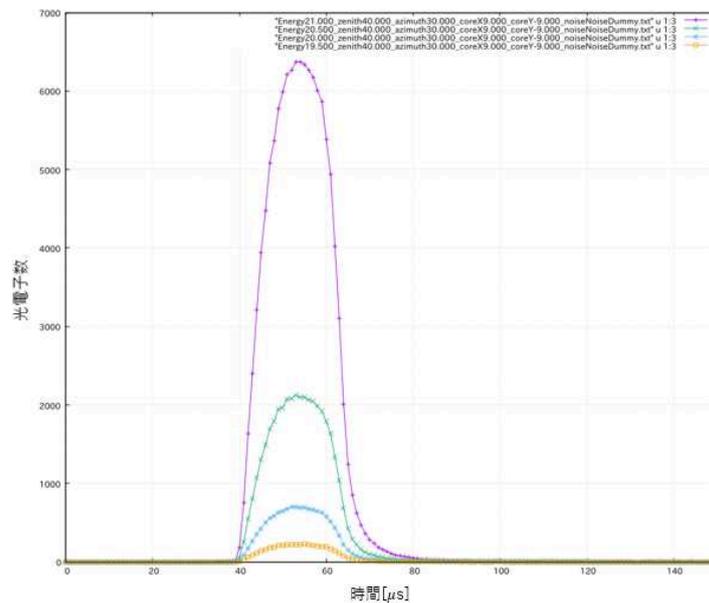


図 6.4 ジオメトリは同値でエネルギーの大きさが異なる疑似波形 [26]. 天頂角が 40 degree, 方位角が 30 degree, 落下地点 X が 9 km, 落下地点 Y が, -9 km で, エネルギーが $10^{19.5} - 10^{21.0}$ までエネルギーのべきで 0.5 ずつ変化させた時の光電子数の時間変化. 縦軸は光電子数, 横軸は時間である. この疑似波形は全て CRAFFT3 が観測した宇宙線空気シャワーを再現している.

次に, 異なる到来方向による疑似波形の違いについて調査した. 図 6.5 にエネルギーと落下地点 (X, Y) は同じで到来方向が異なる疑似波形を示す. (a) は, エネルギーが $10^{17.7}$ eV, 天頂角が 0 degree, 方位角が 0 degree, 落下地点 (X, Y) がそれぞれ 13.0 km, -9.00 km の宇宙線の疑似波形である. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. また, (b) はエネルギーが $10^{17.7}$ eV, 天頂角が 40 deg, 方位角が 130 deg, 落下地点 (X, Y) がそれぞれ 13.0 km, -9.00 km の宇宙線の疑似波形である. 図 6.5 より, (a) に比べ (b) の方が黒と青の波形の波高が低く, 波幅が広い. さらに, 両波形共に立ち上がり時間が遅くなっている. 以上より, 異なる到来方向による波形が異なる様子が確認できた.

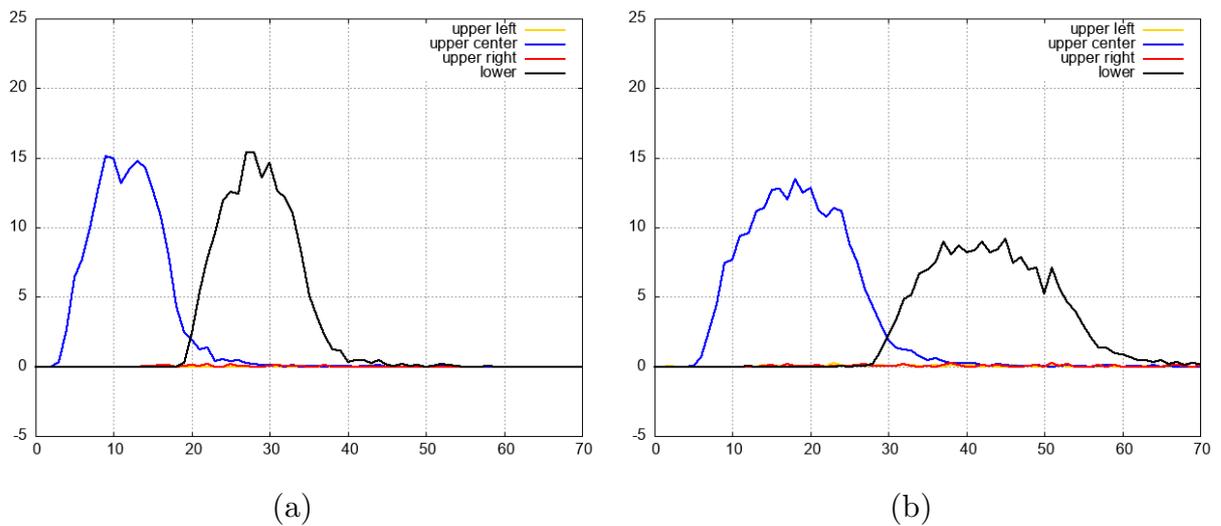


図 6.5 エネルギーと落下地点 (X, Y) は同じで到来方向が異なる疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. エネルギーは $10^{17.7}$ eV, 落下地点 X は 13.0 km, 落下地点 Y は -9.00 km で (a), (b) 共に同値である. しかし, (a) の天頂角は 0 degree, 方位角は 0 degree で, (b) の天頂角は 40 degree, 方位角は 130 degree で異なる値である.

最後に, 異なる落下地点 (X, Y) による疑似波形の違いについて調査した. 図 6.6 にエネルギーと到来方向は同じで落下地点 (X, Y) が異なる疑似波形を示す. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. (c) は, エネルギーが $10^{17.7}$ eV, 天頂角が 0 deg, 方位角が 0 deg, 落下地点 (X, Y) がそれぞれ 13.0 km, -9.00 km の宇宙線の疑似波形である. また, (b) はエネルギーが $10^{17.7}$ eV, 天頂角が 0 deg, 方位角が 0 deg, 落下地点 (X, Y) がそれぞれ 14.0 km, -10.00 km の宇宙線の疑似波形である. 図 6.6 より, (c) に比べ (d) の方が黒と青の波形の波高が高くなっている. さらに, 両波形共に立ち上がり時間が早くなっている. 以上より, 異なる落下地点 (X, Y) による波形が異なる様子が確認できた.

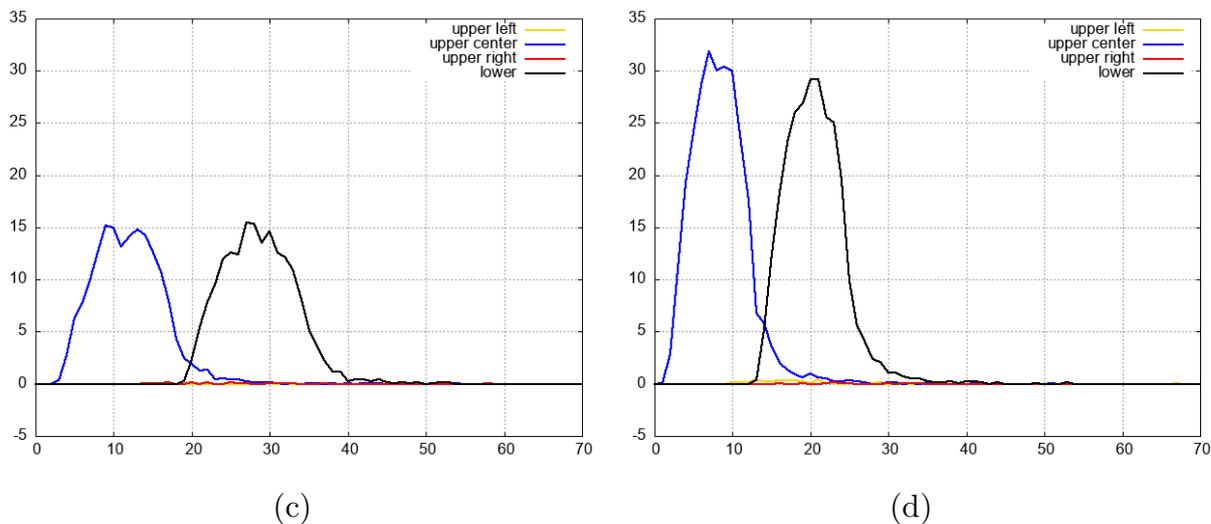


図 6.6 エネルギーと到来方向は同じで落下地点 (X, Y) が異なる疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. エネルギーは $10^{17.7}$ eV, 天頂角は 0 deg, 方位角は 0 deg で (a), (b) 共に同値である. しかし, (c) の落下地点 X は 13.0 km, 落下地点 Y は -9.00 km で, (d) の落下地点 X , は 14.0 km, 落下地点 Y は -10.00 km で異なる値である.

以上の結果より, CRAFFTJava で作成した疑似波形はパラメータによって波形が異なることが言える. そのため, 宇宙線のエネルギー, 到来方向, 落下地点 (X, Y) を決定する手法には, 波形の違いを利用できる可能性があるということが示された.

6.4 夜光ノイズの考慮

図 6.7 は観測波形と CRAFFTjava で再現した疑似波形である. (a) は, 観測波形である. (b) は, (a) の解析結果を CRAFFTjava で再現した疑似波形である. 縦軸が光電子数, 横軸が時間を表している. 色は CRAFFT1 ステーションの視野を表している. 黄色が CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である. 図 6.7 より, 同じ視野の望遠鏡で蛍光が観測されており, 信号の幅も同等である. しかし, CRAFFTjava によって再現した疑似波形は, 観測波形と異なり, 夜光等のノイズが考慮されていない. そのため, 信号のふらつきがない. そこで, CRAFFTjava によって再現した疑似に疑似ノイズを付加し, 観測観測を再現する.

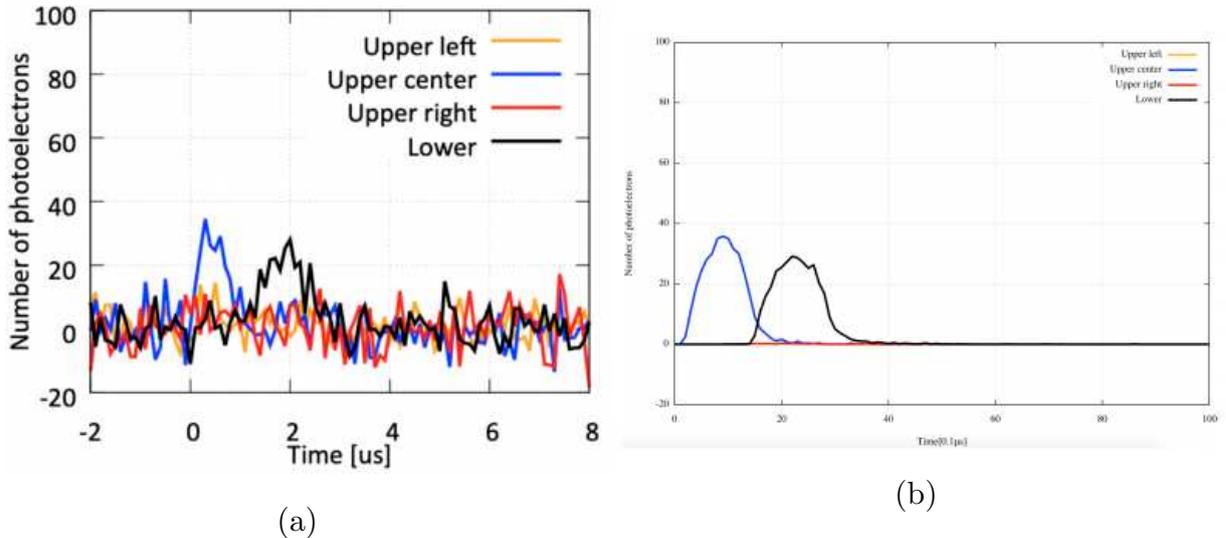


図 6.7 (a) は、観測波形 [19]. (b) は、(a) の解析結果を CRAFFTjava で再現した疑似波形 [27]. 縦軸が光電子数、横軸が時間を表している. 色は CRAFFT1 ステーションの視野を表している. 黄色が CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.

疑似ノイズは、GSL(GNU Scientific Library) を用いて観測される信号の誤差 σ のガウス分布の乱数を発生させ作る. このとき、観測される信号の誤差 σ を以下の式で求める [19].

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{PED}}^2 + \sigma_{\text{P.E.}}^2} \quad (6.2)$$

σ_{PED} はペDESTALの標準偏差, $\sigma_{\text{P.E.}}$ は各望遠鏡が取りうる光電子数の誤差である. ただし, ペDESTALの標準偏差 $\sigma_{\text{PED}} = 6.4$ [19] である. また, 各望遠鏡が取りうる光電子数の誤差, $\sigma_{\text{P.E.}}$ は, 以下の式で求める [19].

$$\sigma_{\text{P.E.}} = \sqrt{N_{\text{P.E.}}} \quad (6.3)$$

$N_{\text{P.E.}}$ は各点の期待値 (CRAFFT シミュレーションで得られた値) である.

図 6.8 に GSL を用いて作成した疑似ノイズの一例を示す. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. また, ペDESTALの標準偏差

$\sigma_{P.E.} = 6.4$ である.

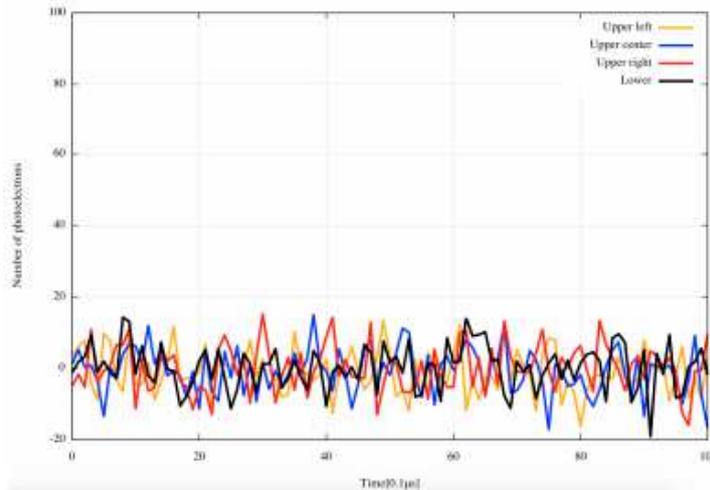


図 6.8 GSL を用いて作成した疑似ノイズの一例 [27]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. また, ペDESTALの標準偏差 $\sigma_{P.E.} = 6.4$ である.

図 6.7(a) の解析結果を CRAFFTjava で再現した疑似波形 (図 6.7(b)) に GSL を用いて作成した疑似ノイズの一例 (図 6.8) を付加し, 観測が期待される疑似波形を作成する. 図 6.9 に観測が期待される疑似波形を示す.

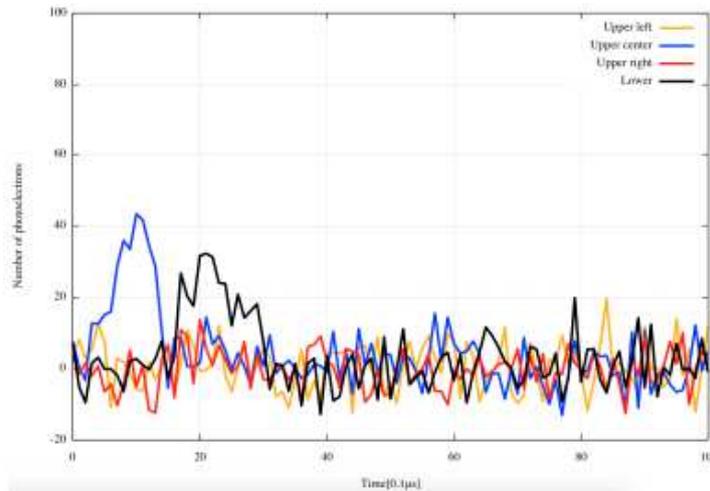


図 6.9 観測が期待される疑似波形 [27]. 縦軸が光電子数, 横軸が時間を表している. 色は CRAFFT1 ステーションの視野を表している. 黄色が CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.

本研究では, 図 6.9 のような観測が期待される疑似波形を観測波形と想定し, 宇宙線空気シャワーの再構成手法の開発や解析精度, 解析効率の調査を進めた.

6.5 S/N 比の計算

宇宙線空気シャワーとノイズを区別するために閾値が必要がある. 6.4 で記したが, CRAFFT は, 宇宙線空気シャワーと夜光等のノイズを波形として観測する. そのため, 宇宙線空気シャワーの信号が極めて小さい場合, その信号はノイズに埋もれてしまい, その信号が宇宙線空気シャワーによるものかノイズかが判別できない. そこで, S/N 比を閾値とし, S/N 比がある値を上回ったときのみ宇宙線空気シャワーの信号として検出する. S/N 比は, 信号 (Signal) と雑音 (Noise) の比である. S/N 比が大きくなるほど, 信号に対してノイズが少ないことを表している. 2017 年の宇宙線空気シャワーの探索時の S/N 比の閾値は 9 であった [19]. 従って, ここでも閾値は 9 とした. また, S/N 比を求めるために, 宇宙線空気シャワーの探索時に使用した以下の式を用いた [19].

$$S/N = \sqrt{\frac{(\sum_{i=j}^{j+N} a(i) - N\mu)^2}{N\sigma^2}} \quad (6.4)$$

N は S/N 比を計算する時間幅に相当する信号の bin 数 (本研究では $N = 10(1 \mu\text{s}$ に相当) とした), $a(i)$ は信号の i bin 目の値を示す関数, μ はペDESTALの平均値, σ はペDESTALの標準偏差 ($\sigma = 6.4$) である.

以下に S/N 比を求める手順を示す.

1. 波形の 0 bin 目から (N)bin 目 (本研究では 0–10 bin 目). まで S/N 比を計算する
2. 波形の 1 bin 目から ($N+1$)bin 目 (波形の 1–11 bin 目) まで S/N 比を計算する
3. 波形の 2 bin 目から ($N+2$)bin 目 (波形の 2–12 bin 目) まで S/N 比を計算する
4. 1.–3. のように S/N 比を計算する範囲を 1 bin ごとにならぬながら波形の最終 bin まで計算する
5. 1 つの波形で計算された最大の S/N 比をこの波形の S/N 比とする.

図 6.10 にある波形に対する S/N 比計算のイメージを示す. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.

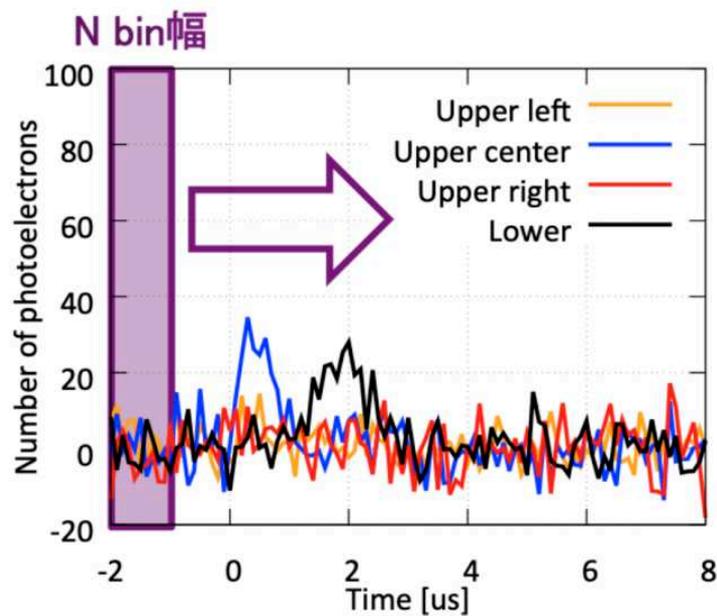


図 6.10 ある波形に対する S/N 比計算のイメージ [19]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.

6.6 波形フィット法について

波形フィット法とは、私が考えた再構成手法である。この手法で CRAFFT が宇宙線を観測した際に、宇宙線のエネルギーや X_{\max} , 到来方向, 落下地点 (X, Y) を特定することが可能であると考えている。以下にその手順を示す。

1. CRAFFT によって、図 6.11 のような観測波形が検出されたとする。図 6.11 の縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している。また, 色は観測した CRAFFT を表している。オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である。

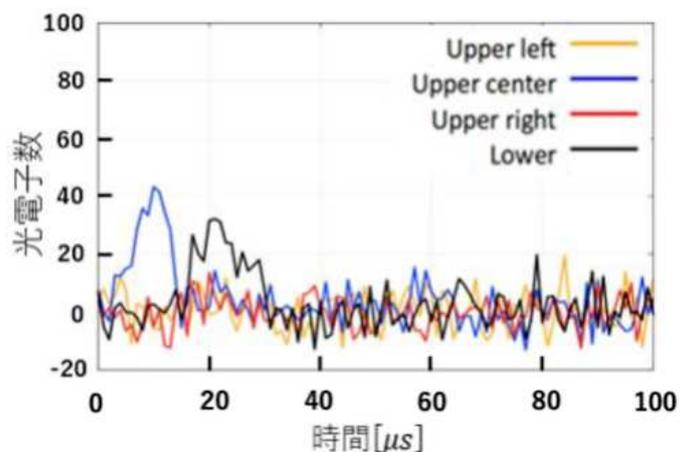


図 6.11 CRAFFT によって検出された観測波形 [27]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している。色は観測した CRAFFT を表している。オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である。

2. CRAFFTjava を用いて, 様々な条件の疑似波形を再現する。図 6.12 に CRAFFTjava を用いて再現した様々な条件の疑似波形を 2 つを示す。図 6.12 の縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している。また, 色は観測した CRAFFT を表している。オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である。

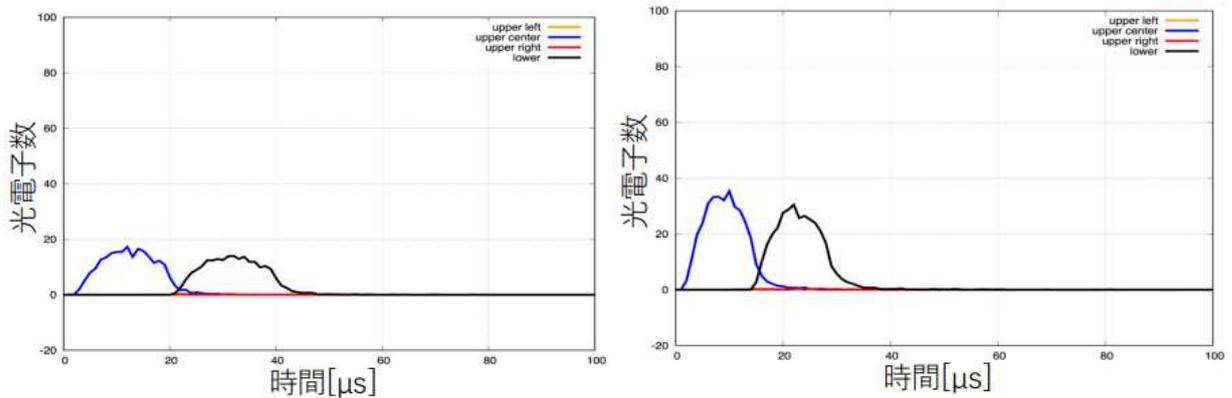


図 6.12 CRAFFTjava を用いて再現した様々条件の疑似波形の 2 例 [28]. どちらも縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.

3. 観測波形と CRAFFTjava を用いて再現した疑似波形を比較する. 図 6.13 に図 6.11 と図 6.12 を比較してる様子を示す.

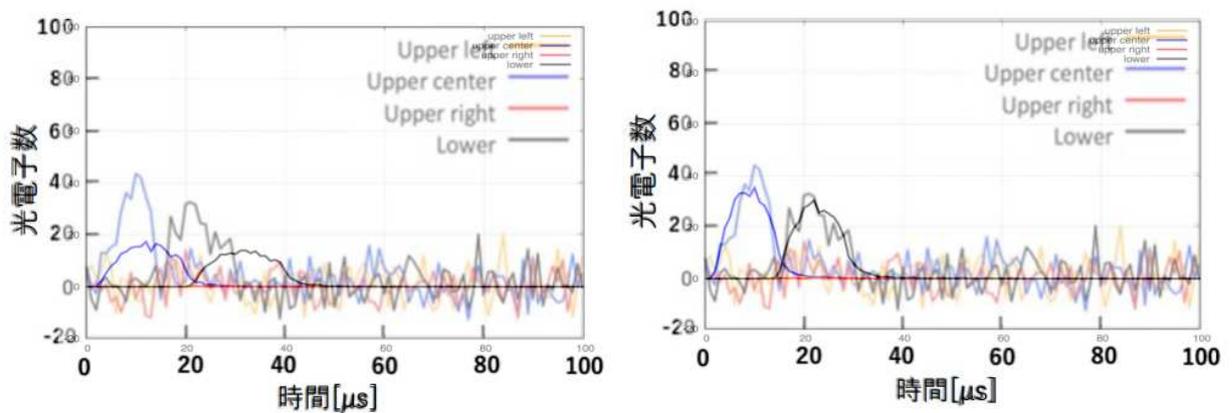


図 6.13 図 6.11 と図 6.12 を比較してる様子. どちらも縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.

4. 3. より, 図 6.13 の右図が最もよく再現できていることが分かる. よって, 図 6.13 の右図のパラメータが CRAFFT によって観測された宇宙線のパラメータとなる.

この方法を定量的に評価するために, 以下の評価指標を用いる. この評価指標は, 求めた値が小さければ一致度が高いことを示している.

$$\chi^2/\text{d.o.f} = \frac{1}{\text{d.o.f.}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x(i) - E(i)}{\sigma E(i)} \right)^2$$

n はデータの個数, $x(i)$ は観測値 (期待される観測波形の光電子数), $E(i)$ は期待値 (CRAFFTjava で得られた光電子数), σ はペDESTALの標準偏差である. かつこの観測値と期待値の差は, 誤差を表している. それを標準偏差で割っている. 誤差が標準偏差ぐらいであればかつこの値は 1 程度になる. そのため, それをデータ数の n 回分足すことになる. よって, χ^2 を n で割った値は, 実データと疑似データがよく一致している場合 1 程度になるはずである. そうでなければ, χ^2 は 1 よりはかるかに大きくなる. ただし, 実際は n ではなく n から拘束条件を引いた自由度 (degree of freedom, d.o.f.) を用いることが一般的である. そこで, ここでも n から拘束条件を引いた自由度を用いている. 以上より, 波形フィット法では, 観測波形と CRAFFTjava で再現した疑似波形の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が最小になる疑似波形から宇宙線のパラメータを求める.

6.7 観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成

波形フィット法を用いて, 宇宙線空気シャワーの再構成落下地点 (X, Y) や到来方向 (天頂角, 方位角), エネルギーを決定が可能か調査した. このとき, 観測波形の代わりに観測が期待される疑似波形を使用した. なぜなら, 極高エネルギー宇宙線の到来頻度は, 到来頻度が 1 km^2 に 1 年で 1 個程度である. そのため, 観測波形を用いて, 宇宙線空気シャワーの再構成の開発はデータ数の関係上現実的ではない. そこで, 観測波形の代わりに観測が期待される観測波形を用いて, 宇宙線空気シャワーの再構成の開発を行った.

6.7.1 到来方向 (天頂角, 方位角) と落下地点 (X, Y), の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成 [27]

鍵谷 (2020) らが到来方向 (天頂角, 方位角) と落下地点 (X, Y) を決定する手法を開発した. 天頂角とは, 球面上において観測者の真上を 0 degree とする角度である. 方位角とは, 北を 0 degree とし地平線に沿って測った角である. 本項では, その手法について紹介する.

まずは、波形フィット法で落下地点 (X, Y) の 2 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成を行う。波形フィット法は、観測が期待される疑似波形と様々な条件の疑似波形が必要である。そこで、まずは表 6.1 に観測が期待される疑似波形のパラメータと落下地点 (X, Y) の再構成のための様々な条件の疑似波形の条件を示す。表 6.1 が条件の観測が期待される疑似波形と条件の様々な条件の疑似波形で波形フィットが行われた。この時、様々な条件の疑似波形の到来方向は、この手法で暫定的な落下地点を決定するため、到来方向を垂直と仮定している。図 6.14 に落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を示す。縦軸は Y 、横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している。カラーは、黄色くなると、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している。赤丸は CRAFFT の位置を表している。図 6.14 より、落下地点 X は 13.80 km、落下地点 Y は -9.80 km という結果を得られた。この結果より、落下地点 (X, Y) は約 400 m で収束している。

表 6.1 観測が期待される疑似波形のパラメータと落下地点 (X, Y) の再構成のための様々な条件の疑似波形の条件 [28]

	観測が期待される 疑似波形のパラメータ	様々な条件の 疑似波形の範囲	様々な条件の 疑似波形の刻み
Energy	$\log E/\text{eV} = 17.00$	$\log E/\text{eV} = 17.00$	
Zenith θ	14.200 deg	0 deg	
Azimuth ϕ	132.400 deg	0 deg	
X	14.180 km	7.0 – 17.0 km	$\Delta X = 0.2 \text{ km}$
Y	-9.950 km	-12.0 – 3.0 km	$\Delta Y = 0.2 \text{ km}$

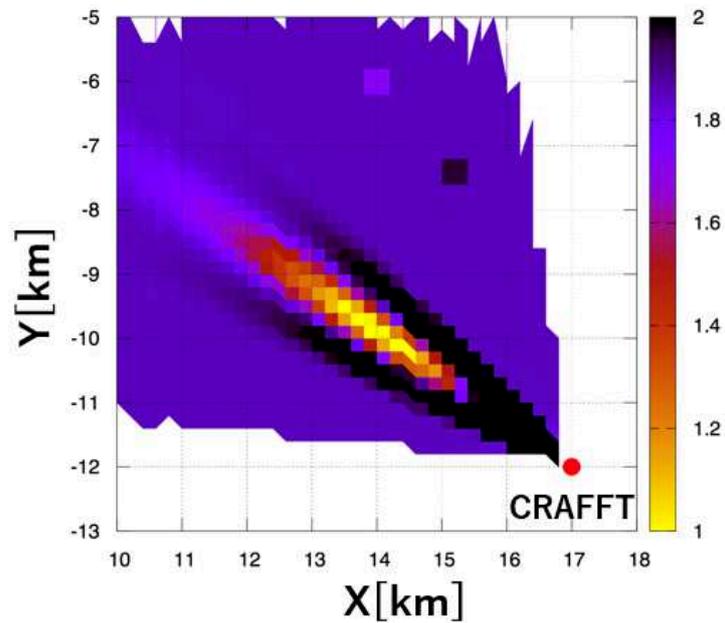


図 6.14 落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布 [28]. 縦軸は Y , 横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 黄色になると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している. 赤丸は CRAFFT の位置を表している.

次に, 暫定的な落下地点を決定したため, 波形フィット法で到来方向の 2 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成を行う. そこで, 新たな様々な条件の疑似波形が必要である. 表 6.2 に観測が期待される疑似波形のパラメータと到来方向の再構成のための様々な条件の疑似波形の条件を示す. ただし, 観測が期待される疑似波形のパラメータは表 6.1 の観測が期待される疑似波形のパラメータと同値である. 表 6.2 が条件の観測が期待される疑似波形と条件の様々な条件の疑似波形で波形フィットが行われた. 図 6.15 に到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を示す. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角, カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 黄色になると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している. 図 6.15 より, 天頂角は 16 degree, 方位角は 134 degree という結果を得られた. この結果より, 到来方向は, 約 2 degree で収束している.

表 6.2 観測が期待される疑似波形のパラメータと到来方向の再構成のための様々な条件の疑似波形の条件 [28]

	観測が期待される 疑似波形のパラメータ	様々な条件の 疑似波形の範囲	様々な条件の 疑似波形の刻み
Energy	$\log E/\text{eV} = 17.00$	$\log E/\text{eV} = 17.00$	
Zenith θ	14.200 deg	0–80 deg	$\Delta\theta = 2$ degree
Azimuth ϕ	132.400 deg	0–360 deg	$\Delta\phi = 2$ degree
X	14.180 km	14.18 km	
Y	-9.950 km	-9.95 km	

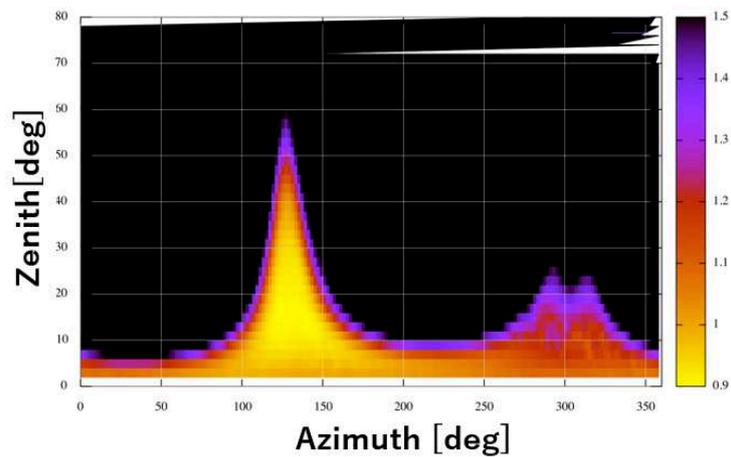


図 6.15 到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布 [28]. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角, カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 黄色くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している.

このように, 落下地点 X, Y と到来方向の波形フィットを繰り返し宇宙線空気シャワーの再構成を行う.

6.7.2 到来方向, 落下地点 (X, Y), エネルギーの 5 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成

本研究では到来方向と落下地点 (X, Y), エネルギーを同時に決定する手法について開発する。これまで, 到来方向と落下地点 (X, Y), エネルギーをそれぞれ決定する手法や到来方向とエネルギーを同時に決定する手法は開発された。しかし, 到来方向と落下地点 (X, Y), エネルギーを同時に決定する手法について開発されていない。そこで, 波形フィット法を用いてグリッドサーチを行う手法を開発した。グリッドサーチとは, ある落下地点 (X, Y) において, 到来方向とエネルギーを順に変更し波形フィットする方法である。鍵谷が開発した手法は, 落下地点と到来方向を暫定的に決定し追い込んでいく。そのため, 波形フィット法を何度も繰り返し, 宇宙線空気シャワーの再構成を行うため, 1, 度の再構成に時間がかかる。そこで, グリッドサーチを行うことで時間の短縮が期待される。

波形フィット法は, 観測が期待される疑似波形と様々な条件の疑似波形が必要である。そのために, 観測が期待される疑似波形を作成した。まず, 観測が期待される疑似波形を作成するために必要な疑似波形 (以下, 観測が期待される疑似波形作成用疑似波形とする) を生成した。表 6.3 に観測が期待される疑似波形作成用疑似波形のパラメータを示す。観測が期待される疑似波形作成用の疑似波形には, ノイズがなく, 純粋な宇宙線空気シャワーの波形である。それゆえ, GSL を用いて作成した疑似ノイズを観測が期待される疑似波形作成用疑似波形に付加し, 観測が期待される波形を生成した。図 6.16 に CRAFFTjava で再現した観測が期待される疑似波形を示す。

表 6.3 観測が期待される疑似波形作成用疑似波形のパラメータ

	パラメータ
Energy	$\log E/\text{eV} = 20$
Zenith	40 deg
Azimuth	30 deg
X	9 km
Y	-9 km
X_{\max}	$750\text{g}/\text{cm}^2$

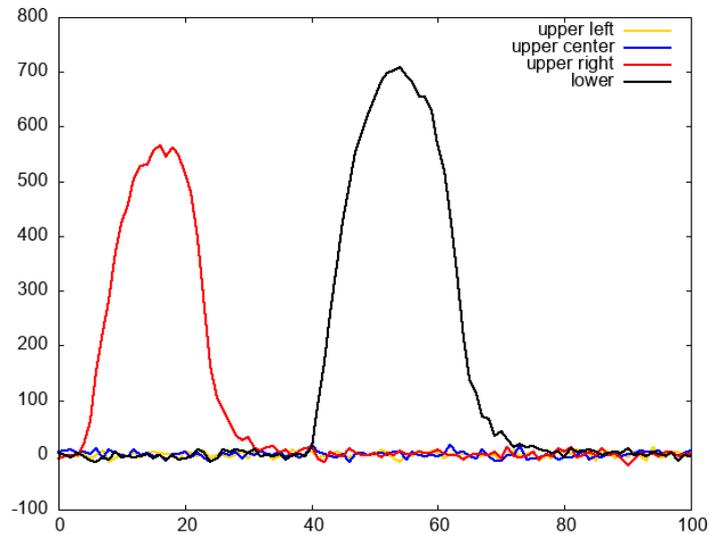


図 6.16 CRAFFTjava で再現した観測が期待される疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジが CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.

次に, 様々な条件の疑似波形を生成した. 様々な条件の疑似波形は, 観測が期待される波形と異なり, ノイズを考慮しない波形である. 表 6.4 に様々な条件の疑似波形の条件を示す.

表 6.16 が条件の観測が期待される疑似波形と表 6.4 が条件の様々な条件の疑似波形で波形フィットを行った. そして, その結果から到来方向, 落下地点 (X , Y), エネルギーそれぞれの $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を作成した.

表 6.4 様々な条件の疑似波形の条件

	範囲	刻み
Energy	$10^{19.0} - 10^{21.5}$ eV	$\Delta \log E/\text{eV} = 0.1$
Zenith θ	10.0 – 80.0 deg	$\Delta\theta = 10$ deg
Azimuth ϕ	30.0 – 60.0 deg	$\Delta\phi = 10$ deg
X	7.0 – 14.0 km	$\Delta X = 1$ km
Y	-11.0 – -7.0 km	$\Delta Y = 1$ km
X_{max}	750 g/cm ²	

まず, 到来方向が再構成できているのか確認した. 図 6.17 に到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を示す. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角 カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している. 図 6.17 より, 到来方向は天頂角が 40 deg, 方位角が 30 deg という結果を得た. この時, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ は, 0.77 であった.

到来方向は再構成できていることは確認できたので, 次は落下地点 (X, Y) が再構成できているのか確認した. 図 6.18 に落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を示す. 縦軸は Y , 横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している. 図 6.18 より, 落下地点 (X, Y) は X が 9 km, Y が -9 km という結果を得た. この時, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ は, 到来方向を調査した結果と同様に 0.77 であった.

到来方向と落下地点 (X, Y) は再構成できていることは確認できたので, 最後にエネルギーが再構成できているのか確認した. 図 6.19 にエネルギーの $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布を示す. 横軸はエネルギーの大きさ, 縦軸は $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. 図 6.19 より, エネルギーは, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ の最小値である 0.77 で 10^{20} eV という結果を得た.

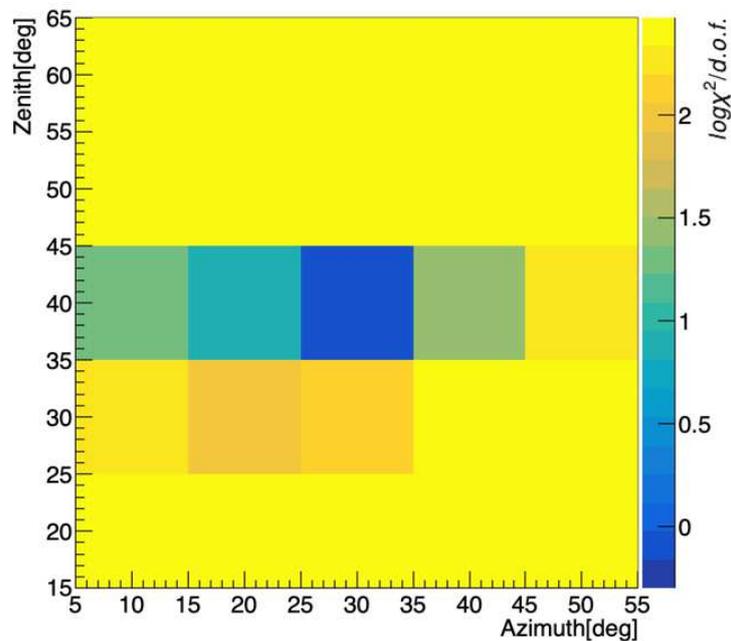


図 6.17 到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角 カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示す.

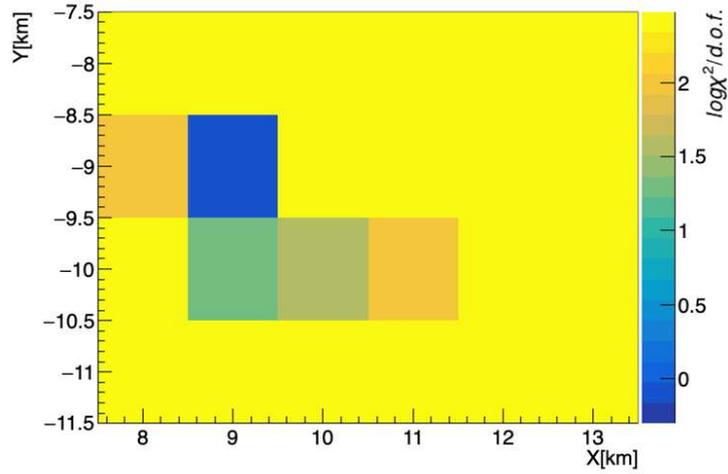


図 6.18 落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 縦軸は Y , 横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示す.

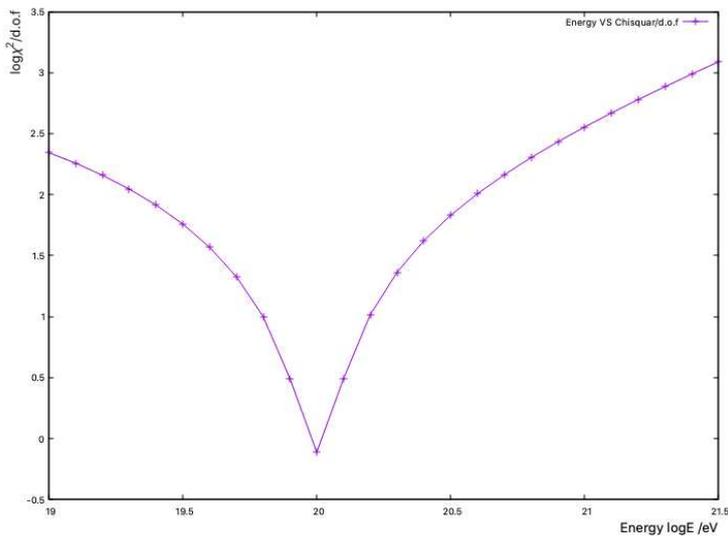


図 6.19 エネルギーの $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 横軸はエネルギーの大きさ, 縦軸は $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している.

図 6.17, 図 6.18, 図 6.19 より, 表 6.3 が条件の観測が期待される疑似波形と $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が最小になった様々な条件の疑似波形の到来方向と落下地点, エネルギーは一致した. つまり, 波形フィット法は探索間隔は荒いが, 到来方向, 落下地点 (X, Y), エネルギーからなる 5 パラメータの解析も可能であるが確認できた. 表 6.5 に疑似波形のパラメータと波形フィットで再構成できた結果を示す.

表 6.5 観測が期待される疑似波形作成用疑似波形のパラメータと波形フィットの結果

	パラメータ	結果
Energy	$\log E/\text{eV} = 20$	$\log E/\text{eV} = 20$
Zenith	40 deg	40 deg
Azimuth	30 deg	30 deg
X	9 km	9 km
Y	-9 km	-9 km
X_{max}	$750\text{g}/\text{cm}^2$	
$\chi^2/\text{d.o.f.}$		0.77

第 7 章

到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構の解析精度

前章で, 波形フィット法は到来方向, 落下地点 (X, Y), エネルギーからなる 5 パラメータの解析も可能であることが証明されたが, 解析精度がまだ見積もられていない. そのため, 波形フィット法の解析精度の調査を行った. 本研究では, 到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いて調査を行った.

本調査にあたり, CARFFTjava と GSL を用いて観測が期待される疑似波形を 774 個作成した. 表 7.1 に解析精度の調査に用いた観測が期待される疑似波形のパラメータを示す. Distance from BR は, 宇宙線の落下地点と CRAFFT の距離である. Distance from BR を指定することで, 落下地点 (X, Y) が CRAFFT を原点とした半径 10 km の円内にランダムで生成するようにしている. Viewing Angle は, CRAFFT を中心に北を 0 deg とし地平線に沿って測った角である. Viewing Angle を指定することで, 落下地点 (X, Y) が CRAFFT 視野と重なるように指定している. また, 表 7.1 が条件の観測が期待される疑似波形の到来方向と落下地点を図 7.1, 図 7.2 に示す. 図 7.1 は縦軸は天頂角, 横軸は方位角を表している. 図 7.2 は縦軸は Y , 横軸は X , 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. 図 7.1, 図 7.2 より, 到来方向と落下地点に極端な偏りが無いことが分かる.

また, 図 7.2 より, 観測が期待される疑似波形の落下地点は, CRAFFT の視野の 1/3 に入っていない. なぜなら, 波形フィット法は 1 イベントを解析するのに時間がかかる. そのため, 視野の半分を調査する. そうすることで, 残りの半分も同程度の結果が得られると期待している.

表 7.1 解析精度の調査に用いた観測が期待される疑似波形のパラメータ

	パラメータ
Energy	$\log E/\text{eV}=20$
Zenith	0.0 – 50.0 deg
Azimuth	0.0 – 360.0 deg
Distance from BR	0.0 – 10.0 km
Viewing Angle	300.0 – 360.0 deg
X_{\max}	750g/cm ²
エントリー数	774 個

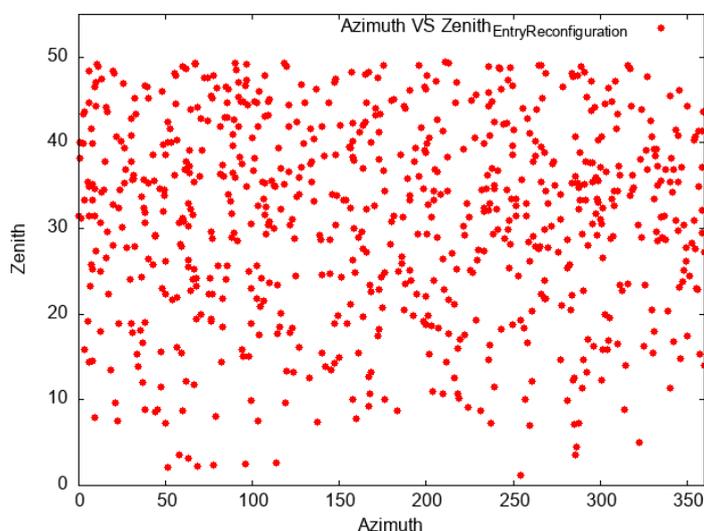


図 7.1 観測が期待される疑似波形の到来方向. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角を表している.

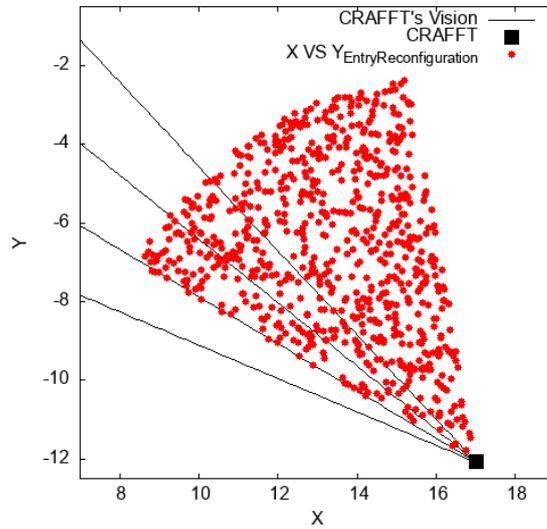


図 7.2 観測が期待される疑似波形の落下地点. 縦軸は Y , 横軸は X , 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している.

次に, 各観測が期待される疑似波形に対する条件の疑似波形が必要である. 表 7.2 に様々な条件の疑似波形の条件を示す. 各パラメータの範囲は, 観測が期待される疑似波形のパラメータに対して前後 3 点で設定している. このままでは分かりづらいので, 解析精度調査のための様々な条件の疑似波形の 1 例を表 7.3 に示す.

表 7.2 解析精度調査のための様々な条件の疑似波形の条件

	範囲	刻み
Energy	$10^{20.0}$ eV	
Zenith θ	$\theta \pm 6$ deg	$\Delta\theta = 2$ deg
Azimuth ϕ	$\phi \pm 6$ deg	$\Delta\phi = 2$ deg
X	$X \pm 6$ km	$\Delta X = 0.2$ km
Y	$Y \pm 6$ km	$\Delta Y = 0.2$ km
X_{\max}	750 g/cm ²	

表 7.3 解析精度調査のための様々な条件の疑似波形の 1 例

	観測が期待される疑似波形	範囲	刻み
Energy	$10^{20.0}$ eV		
Zenith θ	18.787 deg	12 – 25 deg	$\Delta\theta = 2$ deg
Azimuth ϕ	199.566 deg	194 – 207 deg	$\Delta\phi = 2$ deg
X	15.437 km	$X \pm 6$ km	14.8 – 15.9 km
Y	-11.033 km	$Y \pm 6$ km	-11.6 – -10.7 km
X_{\max}	750 g/cm ²		

表 7.3 のような条件の疑似波形で波形フィットを行った。しかし、この条件だけでは、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が大きい値の解析結果も含まれてしまう。そこで、以下の条件も追加し、解析精度の調査を行った。

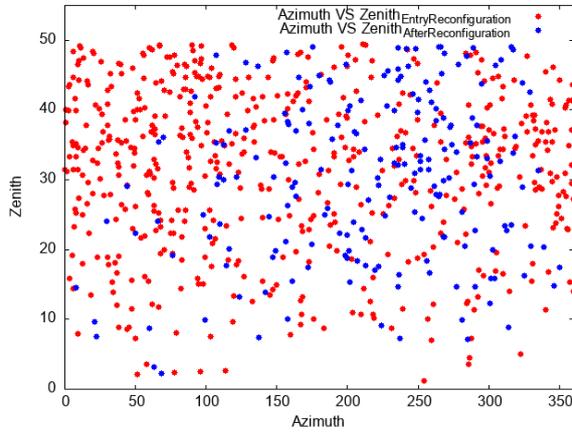
$$\chi^2/\text{d.o.f} \leq 100$$

このとき、解析精度とは、各パラメータの決定精度を指し、パラメータを p としたとき次式のように絶対 (相対) 誤差の平均値と標準偏差で表す。

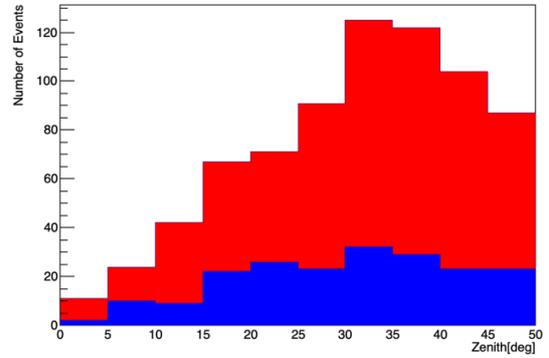
$$\Delta p = \langle p_{\text{Rec}} - p_{\text{Sim}} \rangle \pm \sigma$$

まず、天頂角と方位角の解析精度の調査を行った。図 7.3, 図 7.4 にその結果を示す。図 7.3, 図 7.4 共に (a) は到来方向の散布図, (b) は (a) の天頂角または方位角を表したヒストグラム, (c) は天頂角または方位角の解析精度を表したヒストグラム, (d) は天頂角または方位角の解析精度を表した散布図である。(a) の縦軸は天頂角, 横軸は方位角を表している。赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している。(b) の縦軸はイベント数, 横軸は天頂角または方位角を表している。色については (a) と同様である。横軸の 1 bin は 5 degree である。(c) の縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角の誤差を表している。横軸の 1 bin は 1 degree である。赤線はガウスフィットした結果である。(d) の縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角を表している。紫の直線は傾き 1 の直線で、再構成できた疑似波と観測が期待される疑似

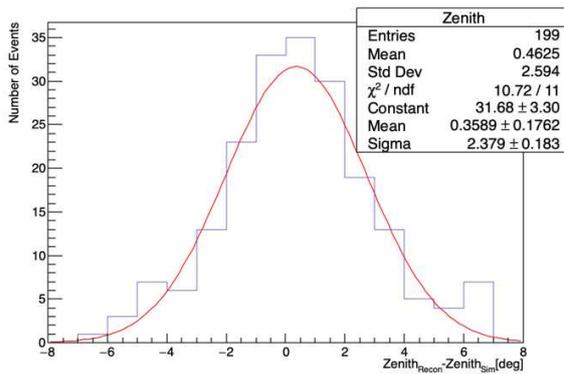
波形の天頂角が近ければ近いほど紫の直線に集まる。図 7.3, 図 7.4 より, 天頂角の解析精度は 0 ± 3 , 方位角の解析精度は -0 ± 3 degree という結果を得た。解析精度は 0 に近ければ近いほどよい。天頂角, 方位角どちらも解析精度の目標は, -3.9 ± 4.8 degree である。これは宇宙線空気シャワーのエネルギーが 10^{18} eV のとき, TAFD のモノ解析での ψ の決定精度である [29]。 ψ とは, 宇宙線シャワーの軸と地平面からなる角度である [30]。以上の事から, 天頂角と方位角は目標値より精度の高い解析が出来ることが実証された。しかし, 方位角は確実な精度とは言えず, 調査範囲の拡大が必要である。なぜなら, 天頂角と比較して全体に対する調査範囲が狭いからである。



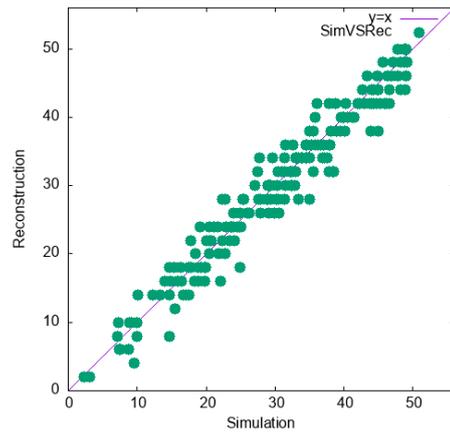
(a)



(b)

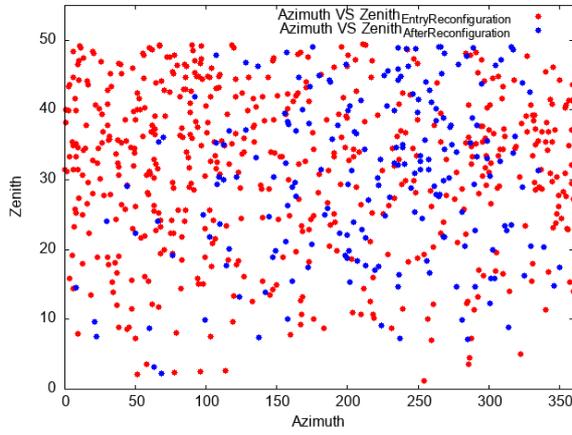


(c)

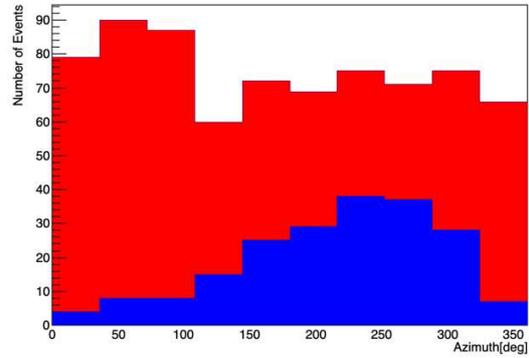


(d)

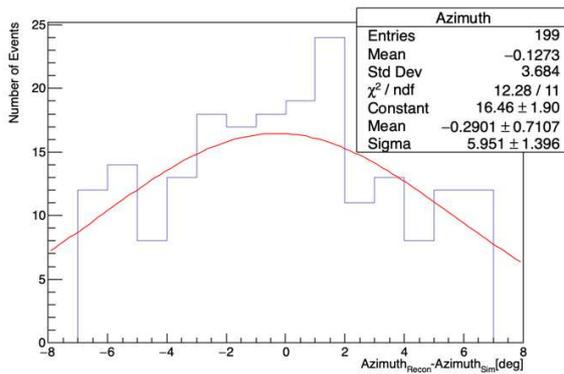
図 7.3 天頂角の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0 ± 3 degree である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の天頂角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角の誤差を表している. 横軸の 1, bin は 1 degree である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 離角の解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の天頂角を表している. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の天頂角が近ければ近いほど紫の直線に集まる.



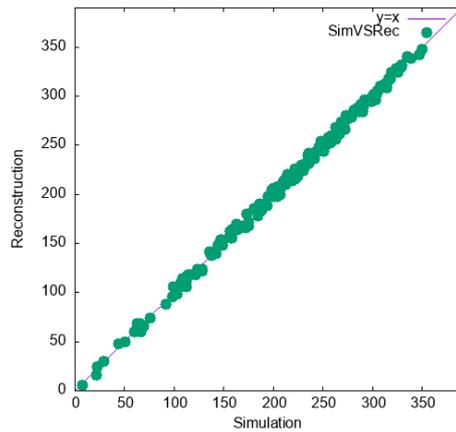
(a)



(b)



(c)



(d)

図 7.4 方位角の解析精度の調査の結果. 解析精度は -0 ± 3 degree である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の方位角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角または方位角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角の誤差を表している. 横軸の 1, bin は 1 degree である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の Azimuth を表している. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の Azimuth が近ければ近いほど紫の直線に集まる.

また,天頂角と方位角それぞれの解析精度では,実際の誤差の判断は難しい.そこで,離角を用いて評価する.離角とは,位置天文学においてある点から見た2つの天体の角度である.離角の解析精度は,天頂角と方位角とは異なり,小さい方から68%の宇宙線空気シャワーが含まれる幅である[31]そのため,小さい方から68%の値が離角の解析精度になる.図7.5に離角の解析精度の調査の結果を示す.縦軸はイベント数,横軸は離角を表している.横軸の1 binは0.5 degである.図7.5より,離角の解析精度は,3±2 degreeという結果を得た.離角も解析精度は0に近ければ近いほどよい.離角の解析精度の目標は,3.2 degreeである.これは宇宙線空気シャワーのエネルギーが 10^{19} eVのとき,TAFDのモノ解析での離角の決定精度である[31].以上の事から,離角は目標値より精度の高い解析が出来ることが実証された.

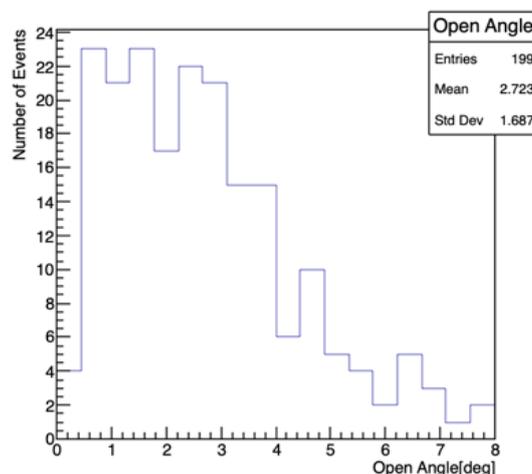


図 7.5 離角の解析精度の調査の結果. 解析精度は 3 ± 2 degreeである. 0に近ければ近いほど解析精度はよい. 縦軸はイベント数,横軸は離角を表している. 横軸の1 binは0.5 degreeである.

次に,落下地点(X, Y)の解析精度の調査を行った. 落下地点(X, Y)の解析精度は,天頂角と方位角と同様に表す. 図7.6,図7.7に落下地点(X, Y)の解析精度の調査の結果を示す. 図7.6,図7.7共に(a)は落下地点の散布図,(b)は(a)の落下地点 X または Y を表したヒストグラム,(c)は,落下地点(X, Y)の解析精度を表したヒストグラム,(d)は,落下地点(X, Y)の解析精度を表した散布図である.(a)の縦軸は Y ,横軸は X を表している.

赤と青は図7.3,図7.4と同様のものを表している. 黒四角はCRAFFT,黒線はCRAFFT

の視野を表している。(b)の縦軸はイベント数,横軸は X または Y を表している。色については(a)と同様である。横軸の1 binは1 kmである。(c)の縦軸はイベント数,横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の X または Y の誤差を表している。横軸の1 binは0.1 kmである。赤線はガウスフィットした結果である。(d)の縦軸は再構成できた疑似波,横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の X または Y を表している。紫の直線は図7.3,図7.4と同様である。落下地点(X, Y)も解析精度は0に近ければ近いほどよい。 X, Y どちらも解析精度の目標は,0.5 kmである。これは宇宙線空気シャワーのエネルギーが 10^{19} eVのとき,TAFDのモノ解析での ΔR の決定精度である[31]。 ΔR とは,観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波の落下地点における距離である[31]。以上の事から,落下地点 X, Y は目標値より精度の高い解析が出来ることが実証された。ただし,落下地点 X, Y では,観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波の落下地点における実際の誤差が判断が難しい。そのため,今後は ΔR の決定精度も調査する必要がある。

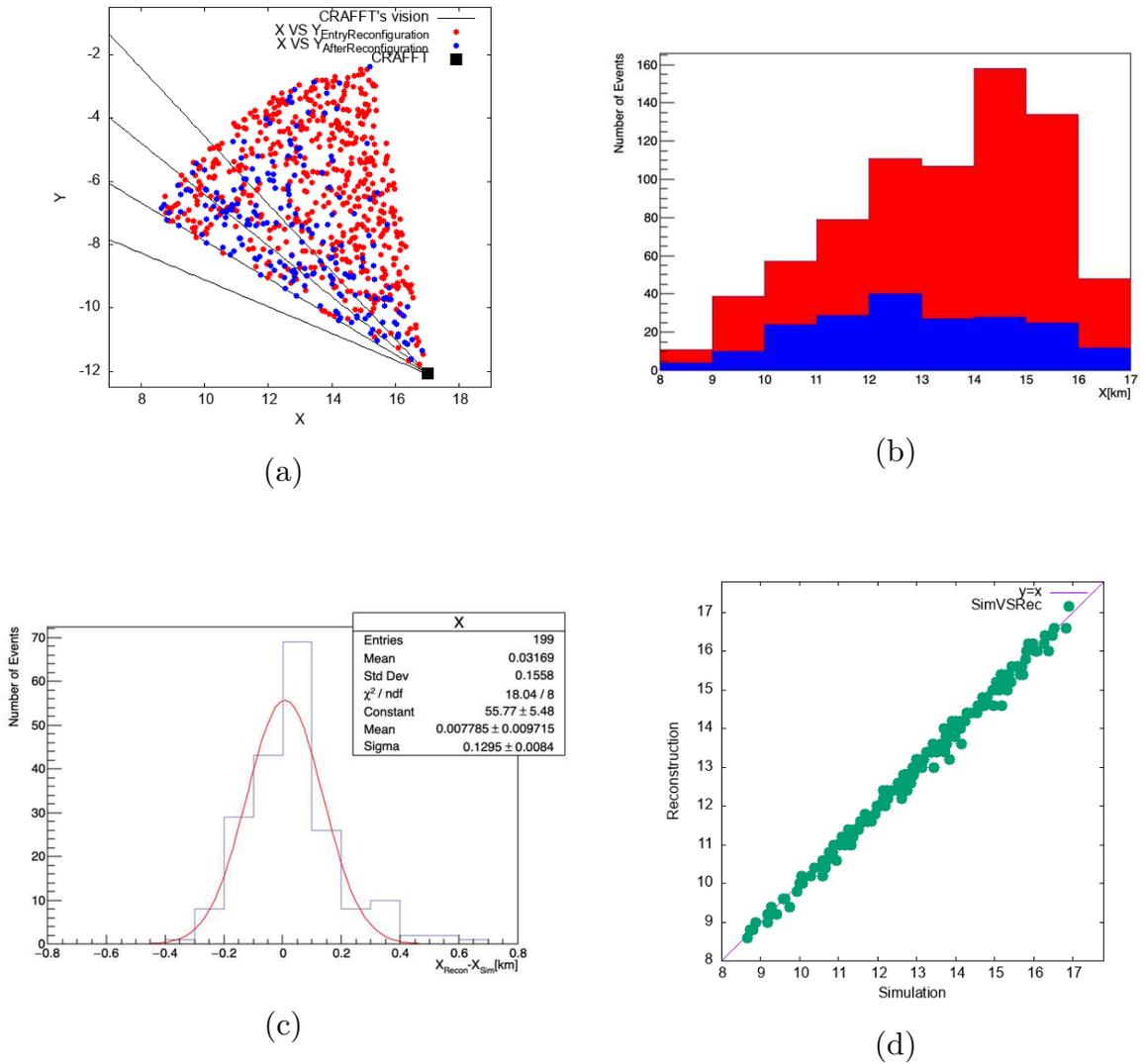
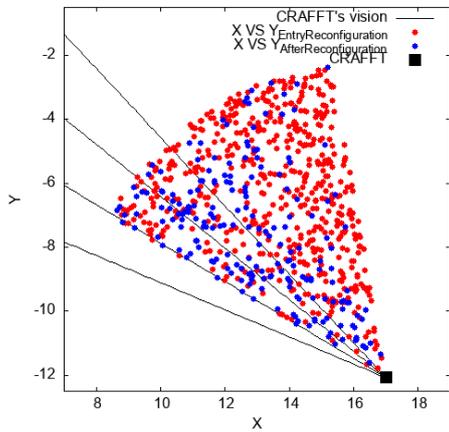
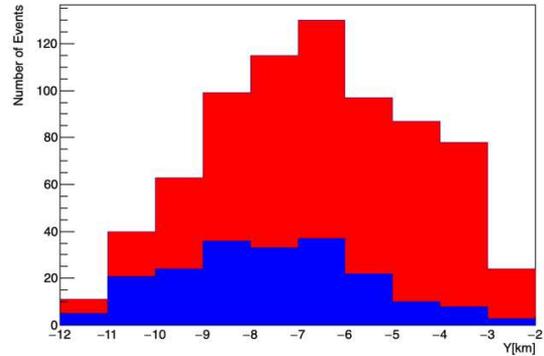


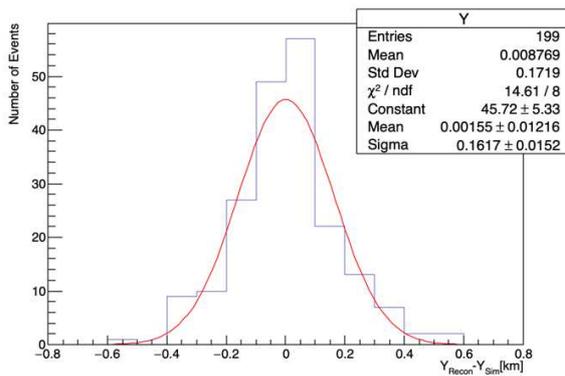
図 7.6 X の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0.0 ± 0.2 km である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が Y , 横軸が X の落下地点の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の X を表したヒストグラム. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 解析精度を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の X の誤差を表している. 横軸の 1 bin は 0.1 km である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は観測が期待される疑似波形の X である. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の X が近ければ近いほど紫の直線に集まる.



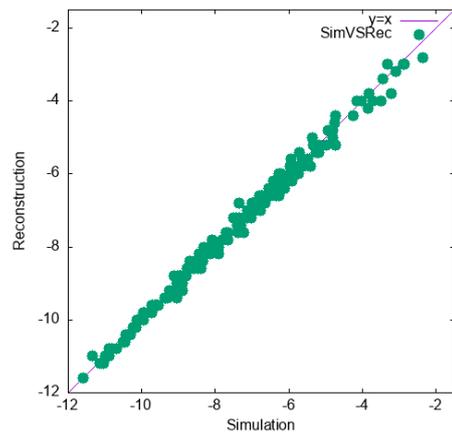
(a)



(b)



(c)



(d)

図 7.7 Y の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0.0 ± 0.2 km である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が Y, 横軸が Y の落下地点の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の Y を表したヒストグラム. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 解析精度を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の X の誤差を表している. 横軸の 1 bin は 0.1 km である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は観測が期待される疑似波形の X である. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の Y が近ければ近いほど紫の直線に集まる.

図 7.3, 図 7.4, 図 7.5, 図 7.6, 図 7.7 より, 到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異

なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構の解析精度を得ることが出来た。これらの結果から得た解析精度と各パラメータの目標値を表 7.4 に示す。表 7.4 より、と落下地点 (X , Y), Open Angle の全てのパラメータは目標値より精度の高い解析が出来ることが実証された。ただし、方位角は全体に対して解析範囲が狭いため、範囲の拡大化が必要である。そのため、解析精度の調査のアップデートが必要である。

表 7.4 各パラメータの目標値と解析精度

	目標値	解析精度
Zenith	$-3.9 \pm 4.8 \text{ deg}$	$0 \pm 3 \text{ deg}$
Azimuth	$-3.9 \pm 4.8 \text{ deg}$	$-0 \pm 3 \text{ deg}$
Open Angle	3.2 deg	$3 \pm 2 \text{ deg}$
X	0.5 km	$0.0 \pm 0.2 \text{ km}$
Y	0.5 km	$0.0 \pm 0.2 \text{ km}$

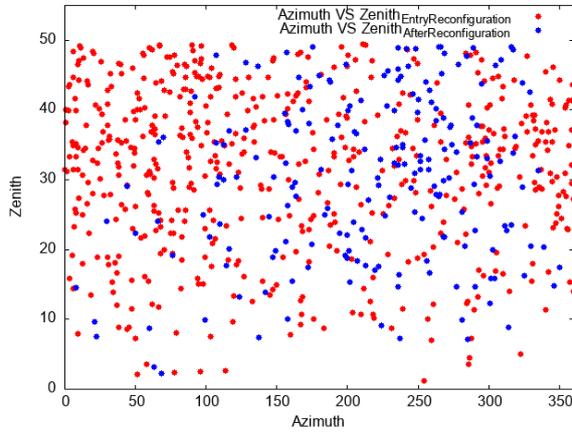
第 8 章

到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成の解析効率

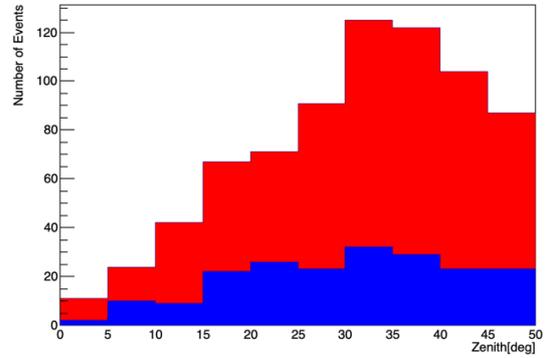
CRAFT が宇宙線として判断した信号をどの程度解析が行えるのか見積もるために解析効率の調査を行った。その際に, 前章で調査した解析精度と同様の観測が期待される疑似波形を用いて, 解析効率の調査を行った。本調査では, 各パラメータ全体の解析効率ではなく, 天頂角は 5 degree, 方位角は 36 degree, 落下地点 (X, Y) は, 10 km ごとで解析効率の調査を行った。

まず, 天頂角と方位角の解析効率の調査を行った。図 8.1, 図 8.2 にその結果を示す。図 8.1, 図 8.2 共に (a) は到来方向の散布図, (b) は (a) の天頂角または方位角を表したヒストグラム, (c) は天頂角または方位角における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比である。(a) の縦軸は天頂角, 横軸は方位角を表している。赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している。(b) の縦軸はイベント数, 横軸は天頂角または方位角を表している。色については (a) と同様である。横軸の 1 bin は 5 degree である。(c) の縦軸は比, 横軸は天頂角または方位角を表している。縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している。この時, 1 bin は 5 degree である。比は, 再構成できた疑似波形の数/観測が期待される疑似波形の数で求めている。図 8.1, 図

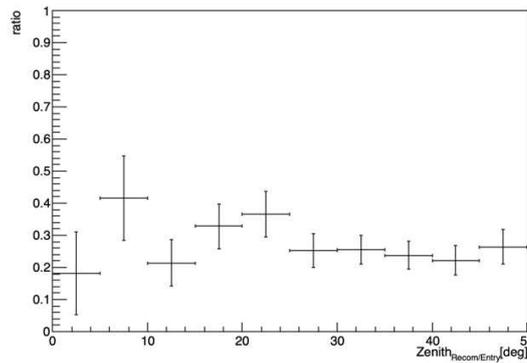
8.2 より,天頂角の解析効率¹⁾は全体的に 30% 程度,方位角の解析効率²⁾は 108-324 degree では 30% 以上という結果を得た.



(a)

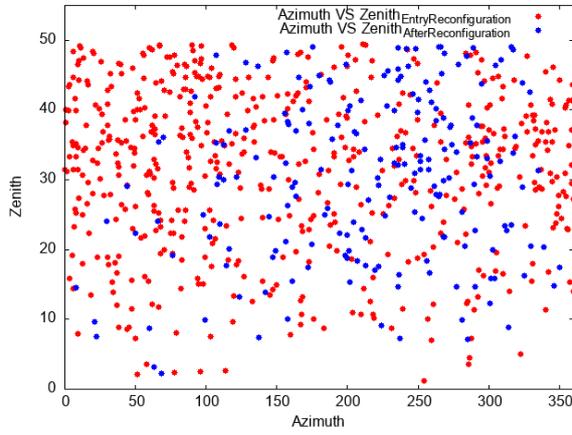


(b)

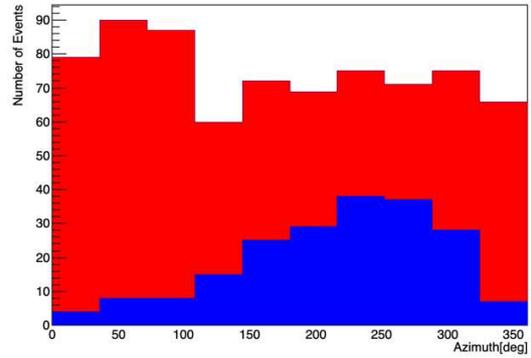


(c)

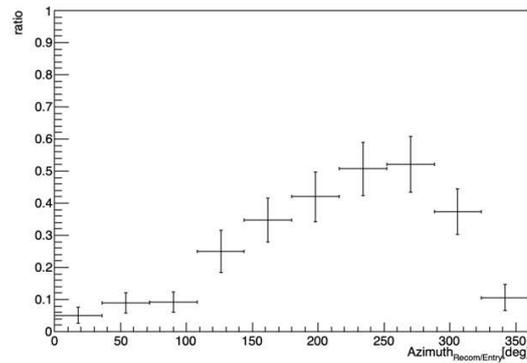
図 8.1 天頂角の解析効率の調査の結果. 解析効率は全体的に 30% 程度である. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の天頂角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸は比, 横軸は天頂角を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 5 degree である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形の数, Entry は観測が期待される疑似波形の数である.



(a)



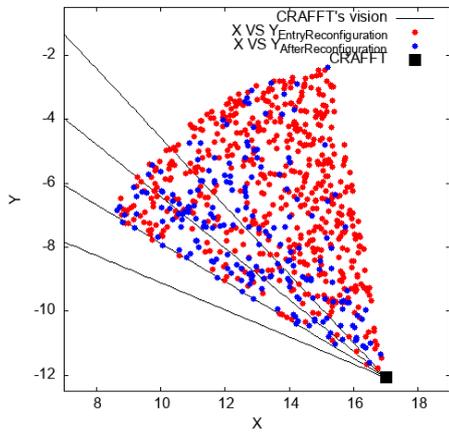
(b)



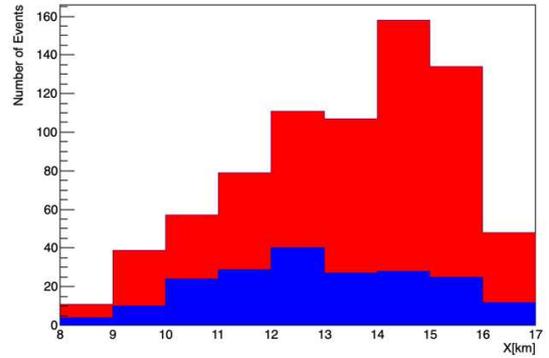
(c)

図 8.2 方位角の解析効率の調査の結果. 解析効率は 108-324 degree では 30% 以上である. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の方位角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は方位角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 60 degree である. (c) は, 方位角における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は方位角を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 5 degree である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形の数, Entry は観測が期待される疑似波形の数である.

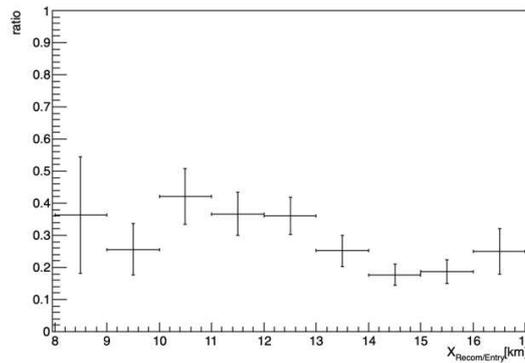
次に, 落下地点 (X, Y) の解析効率の調査を行った. 図 8.3, 図 8.4 にその結果を示す. 図 8.3, 図 8.4 共に (a) は落下地点 (X, Y) の散布図, (b) は (a) の落下地点 X または Y を表したヒストグラム, (c) は落下地点 X または Y における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比である. (a) の縦軸は Y , 横軸は X を表している. 赤と青は図 8.1 と図 8.2 と同様のものを表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) の縦軸はイベント数, 横軸は X または Y を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) の縦軸は比, 横軸は X または Y を表している. 縦軸のエラーバーと横軸のエラーバー, 比の求め方は図 8.1 と図 8.2 と同様である. ただし, この時, 1 bin は 1 km である. 図 8.3, 図 8.4 より, X の解析効率は 8-14, 16-17 km で約 30% 程度, Y の解析効率は解析効率は CRAFFT に近いほど良いという結果を得た.



(a)

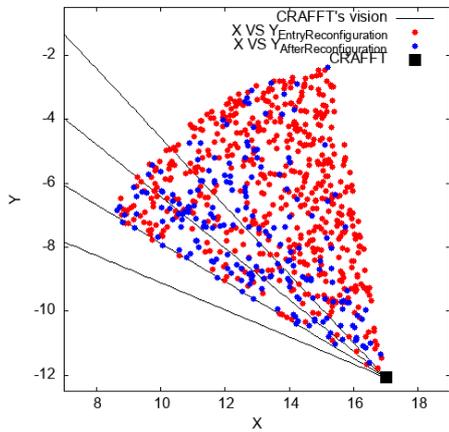


(b)

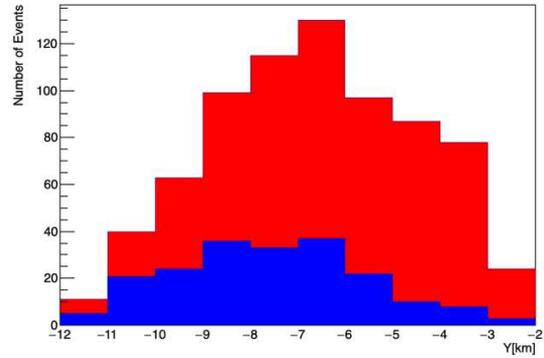


(c)

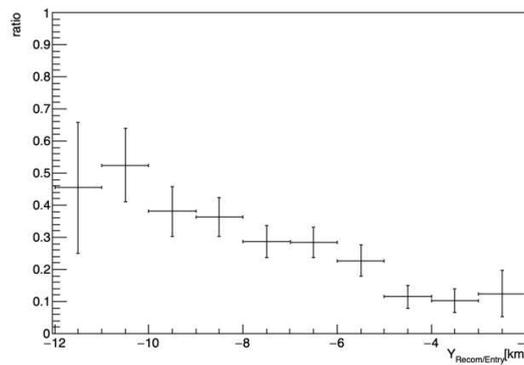
図 8.3 X の解析効率の調査の結果. 解析効率は 8-14, 16-17 km で約 30% 程度である. (a) は, 縦軸 Y , 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFT, 黒線は CRAFT の視野を表している. (b) は, (a) の X を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は X を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, X における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は X を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 1 km である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である.



(a)



(b)

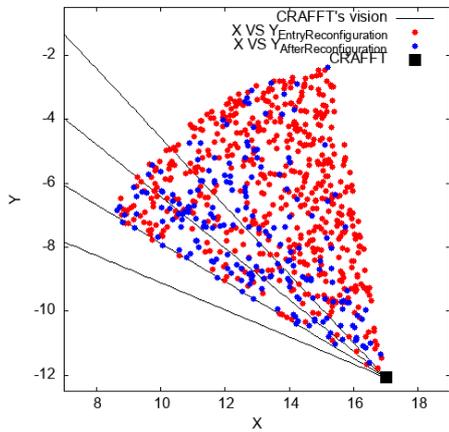


(c)

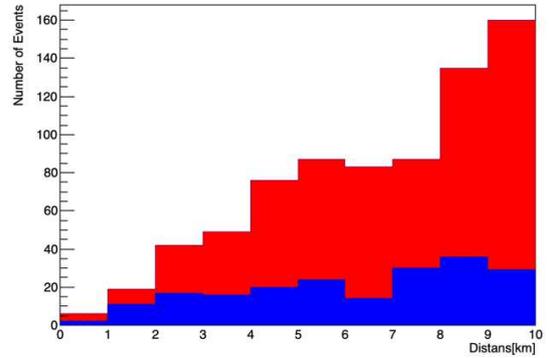
図 8.4 Y の解析効率の調査の結果. 解析効率は CRAFFT に近いほど良い. (a) は, 縦軸 Y, 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の Y を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は Y を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, Y における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は Y を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 0.1 km である. 比は, Recon/Entry で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である.

しかし, これでは CRAFFT と実際にどの程度離れているのか判断するのが難しい. そこ

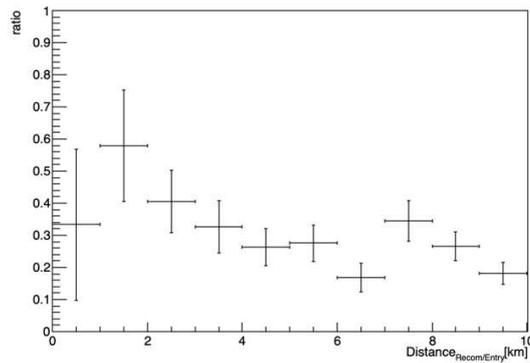
で, 落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離 (10 km ごと) の解析効率を調査した. 図 8.5 に落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離の解析効率の調査の結果を示す. (a) は落下地点 (X, Y) の散布図, (b) は (a) の落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離を表したヒストグラム, (c) は落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比である. (a) の縦軸は Y , 横軸は X を表している. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) の縦軸はイベント数, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) の縦軸は比, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 1 km である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である. 図 8.5 より, 落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離の解析効率は 0-6, 7-9 km で約 30% 程度という結果を得た.



(a)



(b)



(c)

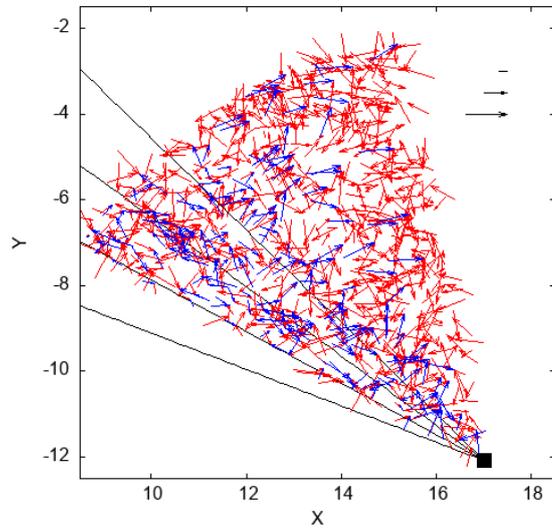
図 8.5 落下地点 (X, Y) と CRAFTT の距離の解析効率の調査の結果. 解析効率は 0-6, 7-9 km で約 30% 程度である. (a) は, 縦軸が Y , 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFTT, 黒線は CRAFTT の視野を表している. (b) は, (a) を落下地点 (X, Y) と CRAFTT の距離ごとに表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFTT の距離を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 落下地点 (X, Y) と CRAFTT の距離における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFTT の距離を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 1 km である. 比は, Recon/Entry で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である.

図 8.1, 図 8.2, 図 8.3, 図 8.4, 図 8.5 より, 到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータが異なる観測が期待される疑似波形を用いた宇宙線空気シャワーの再構成の解析効率を得ることが出来た. これらの結果から得た解析効率を表 8.1 に示す. 表 8.1 より, 到来方向, 落下地点 (X, Y) の 4 パラメータと落下地点と CRAFFT の距離の再構成の解析効率を求めた.

表 8.1 解析効率

	解析効率
Zenith	全体的に 30% 程度
Azimuth	108 - 324 deg では 30% 以上
X	8 - 14, 16 - 17 km で約 30% 程度
Y	CRAFFT に近いほど良い
Distance from CRAFFT	0 - 6, 7 - 9 km で約 30% 程度

しかし, これでは, 再構成した宇宙線空気シャワーの特徴は分かっていない. そこで, 再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴の調査を行った. 図 8.6 に再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴を示す. 図 8.6 より, CRAFFT2 と 3 は CRAFFT に向かってくるまたは遠ざかっていく空気シャワー, CRAFFT4 は CRAFFT の視野にかすめた空気シャワーを再構成しやすい特徴がある. ただし, この調査に使用した観測が期待される疑似波形の条件が非常に限定的であるため, 解析効率と再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴は確からしいとは言いがたい. 例えば, CRAFFT は 10^{20} eV のエネルギーを持つ宇宙線空気シャワーであれば 40 km 程度まで観測が可能である [19]. しかし, 本調査の落下地点と CRAFFT の距離は最大でも 10 km である. そのため, 落下地点と CRAFFT の距離を 40 km まで拡大し, 調査を行うべきである. そうすることで, ステレオで観測する際の 1 台当たりの距離を見積もることが出来る. さらに, CRAFFT を中心とした円形に落下地点を指定し調査を拡大することで, 1 ステーションごとの隣接距離を見積もることが出来る. そのため, 解析効率と再構成しやすい宇宙線空気シャワーの調査のアップデートが必要である. また, CRAFFT の視野をかすめたり, 視野内に落下地点がある宇宙空気シャワーでも再構成出来ていないものもある. 今後はそのような宇宙線空気シャワーの特徴なども調査する必要がある.



(c)

図 8.6 再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴. 赤のベクトルは解析精度の調査に使用した疑似波形, 青のベクトルは再構成できた疑似波で, ベクトルの向きは方位角, 長さは天頂角を表している.

第 9 章

波形フィット法の閾値の最適化の検討

波形フィット法の閾値は 9σ である。そのため、S/N 比が 9σ 以上の宇宙線空気シャワーを再構成する。これは、2017 年の宇宙線空気シャワーの探索時の S/N 比の閾値は 9σ であったためである [19]。そのため、波形フィット法の閾値が 9σ で適性であるか調査されていない。そこで、各閾値における解析精度を調査する。そうすることで、解析精度がある程度一定になる最小の閾値が適性な閾値と言える。本章でも、第 7 章、第 8 章で調査した解析精度や解析効率と同様の観測が期待される疑似波形を用いて、解析効率の調査を行った。図 9.1 に各閾値における宇宙線空気シャワーのイベント数を示す。縦軸はイベント数、横軸は閾値を表している。紫点はある閾値以上全てのイベント数を示している。図 9.1 より、閾値が大きくなると、宇宙線空気シャワーのイベントは減少している。そのため、閾値が大きすぎると CRAFFT の研究背景にある観測統計量の増加に影響することが分かる。

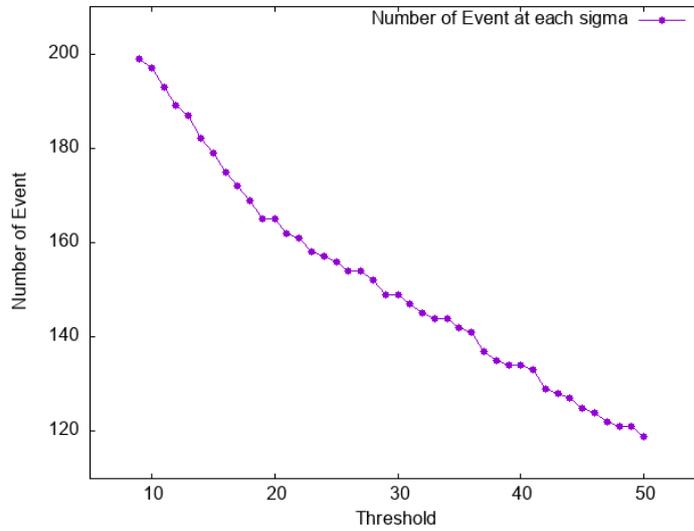


図 9.1 各閾値における宇宙線空気シャワーのイベント数. 縦軸はイベント数, 横軸は閾値を表している. 紫点はある閾値以上全てのイベント数を示している.

まず, 図 9.2, 図 9.3 に各閾値における天頂角と方位角の決定精度を示す. 図 9.2, 図 9.3 共に縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の天頂角の決定精度を示している. 緑線は紫点のある関数でフィッティングした結果である. 図 9.2 のフィッティングした結果は $A_{\text{Rec}} = -0.0T + 0.4$, 図 9.3 のフィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.0T - 0.2$ であった. 図 9.2, 図 9.3 より, 閾値が大きくなっても天頂角と方位角どちらもの決定精度はあまり変化がない.

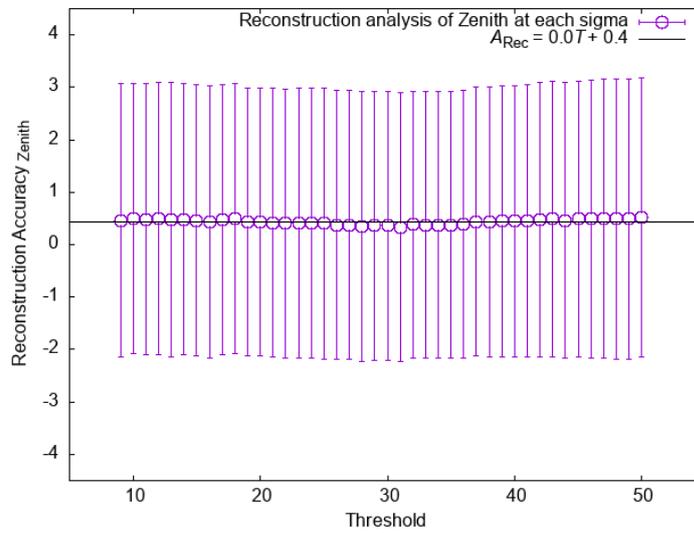


図 9.2 各閾値における天頂角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の天頂角の決定精度を示している. 緑線は紫点のある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.0T + 0.4$ であった.

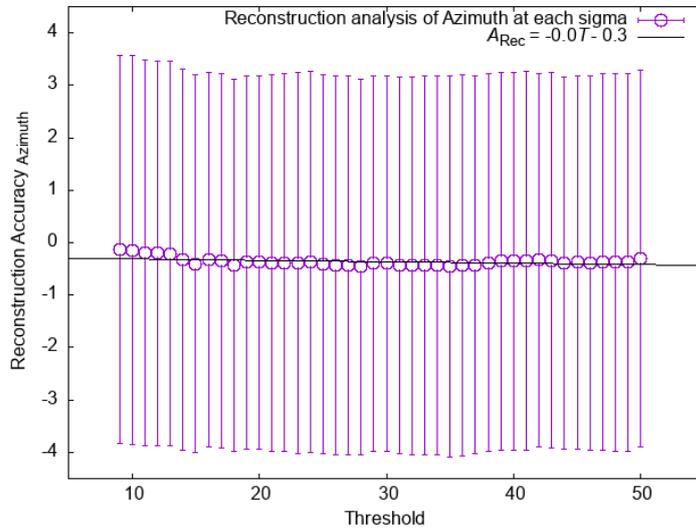


図 9.3 各閾値における方位角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の方位角の決定精度を示している. 緑線は紫点のある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.07T + 0.3$ であった.

到来方向の解析精度は天頂角と方位角だけでなく, 離角での評価が重要である. そのため, 図 9.4 に各閾値における離角の決定精度を示す. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の離角の決定精度を示している. 図 9.4 より, 閾値が大きくなるにつれ離角の決定精度は向上している.

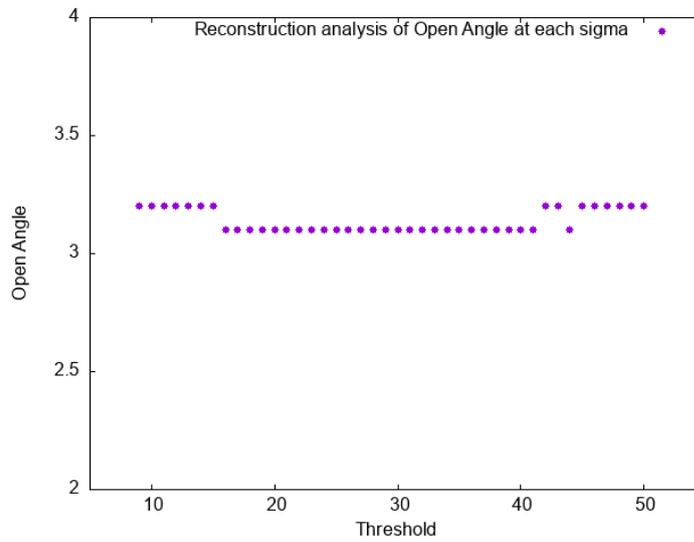


図 9.4 各閾値における離角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の離角の決定精度を示している.

次に, 図 9.5, 図 9.6 に各閾値における落下地点 (X, Y) の決定精度を示す. 図 9.5, 図 9.6 共に縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の落下地点 X の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. 図 9.5 のフィッティングした結果は $A_{\text{Rec}} = -0.00T + 0.02$, 図 9.6 のフィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.000T + 0.005$ であった. 図 9.5, 図 9.6 より, 閾値が大きくなっても落下地点 (X, Y) の決定精度はあまり変化がない.

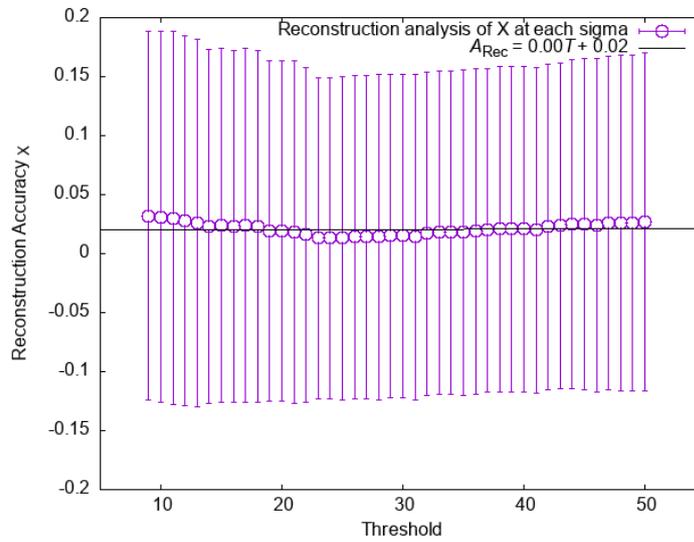


図 9.5 各閾値における落下地点 X の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の落下地点 X の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.00T + 0.02$ であった.

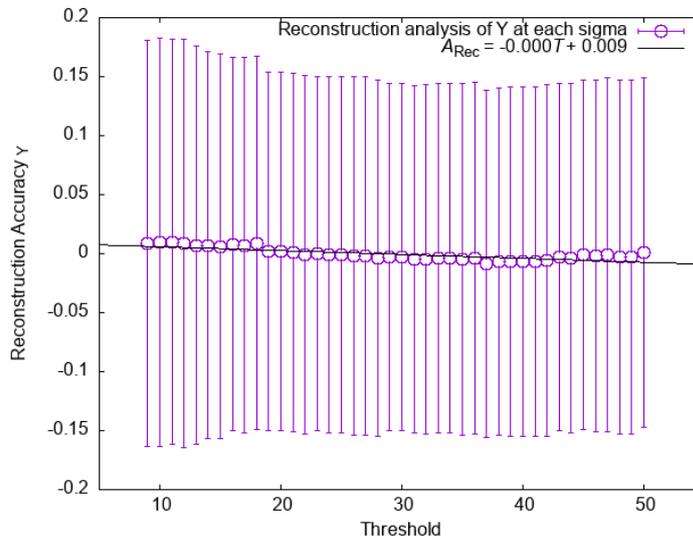


図 9.6 各閾値における落下地点 Y の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の落下地点 Y の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.000T + 0.005$ であった.

図 9.2, 図 9.3, 図 9.4, 図 9.5, 図 9.6 より, 到来方向と落下地点 X, Y の解析精度は閾値が大きくなってもあまり変化はなく, 離角の解析精度は閾値が大きくなるにつれ, 小さくなった. しかし, 第 7 章より, 離角の解析精度は目標値より小さい. それゆえ, 閾値は現状の 9σ が十分である. だが, これは, エネルギーや X_{max} の解析精度や閾値が 9σ 以下の場合を考慮していない. 従って, エネルギーや X_{max} の解析精度や閾値が 9σ 以下の場合の調査も必要がある. そのため, S/N 比と解析精度の関係の調査のアップデートが必要である.

第 10 章

結論

10.1 まとめ

次世代の超高エネルギー宇宙線観測実験の大規模化を行うために、低コストかつ完全自動で宇宙線を観測することが出来る大気蛍光望遠鏡 Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope(CRAFFT) の研究・開発を行っている。2017年に CRAFFT の宇宙線観測能力が実証された。しかし、CRAFFT は、低コスト化に伴いシンプルな構造をしているため、FD よりも低空間分解能である。そのため、既存の再構成手法を用いることはできず、従来の手法で宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点を推定することが不可能である。そこで、新たに宇宙線のエネルギーや到来方向、落下地点を解析する手法として、波形を用いた再構成手法”波形フィット法”を開発した。

本研究では、波形フィット法を用いた到来方向、落下地点、エネルギーを決定する解析手法を開発、解析精度および解析効率の調査、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。その際、検出器シミュレーションを用いて、観測が期待される疑似波形と様々な条件の疑似波形を生成し、解析手法の開発を行った。まず、波形フィット法を用いた到来方向、落下地点、エネルギーを決定する解析手法を開発を行った。その結果、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が最小になった様々な条件の疑似波形と観測が期待される疑似波形の到来方向と落下地点、エネルギーは一致した。つまり、波形フィット法は探索間隔は荒いが、到来方向、落下地点 (X, Y) 、エネルギーからなる 5 パラメータの解析も可能であるが確認できた。その後、解析精度がまだ調査されていなかったため、到来方向と落下地点の解析精度の調査を行った。その結果、到来方向と落下地点の全てのパラメータで目標値を下回ることが出来た。また、解析精度の調

査の際に使用した観測が期待される疑似波形 774 個に対して再構成できた疑似波 199 個であった。そこで、解析効率の調査を行い、再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴の調査を行った。その結果、CRAFFT2 と 3 は CRAFFT に向かってくるまたは遠ざかっていく空気シャワー、CRAFFT4 は CRAFFT の視野にかすめた空気シャワーを再構成しやすい特徴があった。最後に、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。波形フィット法の閾値は 9σ ($\sigma=6.4$) である。しかし、これが適性であるか調査されていない。そこで、波形フィット法の閾値の最適化の検討を行った。その結果、到来方向と落下地点 X, Y の解析精度は閾値が大きくなってもあまり変化せず、離角の解析精度は閾値が大きくなるにつれ小さくなった。しかし、離角の解析精度は目標値より小さいため、閾値は現状の 9σ が十分である。

10.2 今後の展望

本研究では、 X_{\max} を一定にすることで同様な空気シャワーの宇宙線を用いて、再構成手法の開発を行った。しかし、実際の空気シャワーは宇宙線によって異なる。そのため、 X_{\max} もフリーパラメータとし、異なる空気シャワーの宇宙線の到来方向 (天頂角, 方位角), 落下地点 (X, Y), エネルギーの再構成手法の開発を行う。しかし、現在使用している CRAFFTjava では、 X_{\max} を指定しても反映されない。通常、CRAFFTjava は、 X_{int} を参照し、 X_{\max} を決定している。しかし、現行の CRAFFTJava では、 X_{int} を参照せずに X_{\max} は固定値として運用されている。そこで、 X_{int} を参照し、 X_{\max} を決定するように CRAFFTjava のアップデートが必要である。その後、波形フィット法を用いて、到来方向 (天頂角, 方位角), 落下地点 (X, Y), エネルギーの 5 パラメータに X_{\max} を加えた 6 パラメータで宇宙線空気シャワーの再構成手法の開発が必要である。

また、到来方向と落下地点の解析精度と解析効率のアップデートが必要である。解析精度は方位角が全体に対して解析範囲が狭いため、範囲の拡大化が必要である。さらに、エネルギーと X_{\max} の解析精度の調査も行う。解析効率は落下地点と CRAFFT の距離を 40 km まで拡大し、調査を行うべきである。CRAFFT は 10^{20} eV のエネルギーを持つ宇宙線空気シャワーであれば 40 km 程度まで観測が可能である。観測可能範囲限界までで調査することで、ステレオで観測する際の 1 台当たりの距離を見積もることが出来る。さらに、CRAFFT を中心とした円形に落下地点を指定し調査を拡大することで、1 台ごとの隣接距離を見積もることが出来る。そのため、解析精度と解析効率の調査のアップデートが必要である。また、CRAFFT の視野をかすめたり、視野内に落下地点がある宇宙空気シャワーでも再構成出来ていないも

のもある。今後は、そのような宇宙線空気シャワーの特徴なども調査する必要がある。

さらに、閾値は現状の 9σ が十分であるが、これは、エネルギーや X_{\max} の解析精度や閾値が 9σ 以下の場合を考慮していない。従って、エネルギーや X_{\max} の解析精度や閾値が 9 以下の場合の調査も必要がある。そのため、S/N 比と解析精度の関係の調査のアップデートが必要である。

謝辞

CRAFFT 実験において重要部である本研究に携わる機会を与えていただき、研究を進める全てにおいて数多くのご助言、ご指導頂きました大阪電気通信大学の多米田裕一郎准教授に深く感謝申し上げます。また、大学入学時のグループ担任から始まり、大学院卒業まで6年に渡り、ご指導ご鞭撻していただきありがとうございました。私の大学生活は多米田裕一郎准教授なしでは語れません。誠に深く感謝申し上げます。

本研究の共同研究者会議だけでなく、初めての学会発表の際に寝る間も惜しんでのご指導や出張の際に私が過ごしやすいように気をつけていただくなど他大学の学生にも関わらず大変お世話をして頂いた信州大学の富田孝幸助教に深く感謝申し上げます。

本研究の共同研究者会議において、進歩報告の際に丁寧かつ多くの助言を頂くだけでなく、1年半もの間、取りまとめや多くの学会での発表など貴重な経験をさせていただいた神奈川大学の池田大輔特別助教、中部大学の山崎勝也講師、東京大学宇宙線研究所の藤田慧太郎特任研究員、ユタ大学の Kim JiHyun 博士研究員に深く感謝申し上げます。信州大学の中村雄也氏、窪田悠人氏、栗栖真乃祐氏、高桑宏輔氏は、同じ CRAFFT 学生メンバーとして、CRAFFT 実験を行えたことに深く感謝申し上げます。

多米田研究室の先輩である奥悠弥氏、笠見沙織氏、鍵谷鷹氏、柴田規迪氏、吉田風吾氏、神藤大輝氏、石原詢也氏、岩見祐吾氏、乙守慎太郎氏には、多くの助言や多くの思い出を頂きました。同期の山下太地氏とは、共に支え合うことで楽しく研究室生活を送れました。後輩の村上、実哉斗氏、佐藤聖真氏、高木勇太朗氏、石本康樹氏、甲斐仁武氏、清水将介氏、藤岡桃歌氏、坊峻弥氏、森下智也氏、片山智貴氏、小林悠雅氏、小森康平氏、岩上拓生氏、上野愛莉氏、楠森優貴氏、森瑞季氏には、時には厳しいことも言いましたが、慕って頂いたおかげで成長することができました。特に大学院進学後は同期がおらず、挫けそうなきもありませんでしたが、皆様が支えて下さったおかげで楽しい大学院生活でした。誠に深く感謝申し上げます。

TA 実験の共同研究者会議などで様々なご助言を頂きました東京大学宇宙線研究所の荻

尾彰一教授, さこ 隆志准教授, 大阪公立大学の常定芳基教授, 藤井俊博准教授, 東京大学理学研究所の樋口 諒特別研究員に深く感謝いたします。

明野観測所での検出器製作や TA 実験の共同研究者会議をはじめとする多くの場面で大変お世話になりました信州大学の中澤新氏, 中村 智行氏, 柴崎 悠馬氏, 齊藤亮介氏, 日比亮佑氏, 安部泰明氏, 佐藤 大輝氏, 水野 航太氏, 宮下 航平氏, 當波 孝明氏, 東京大学宇宙線研究所の関野幸市氏, 藤末 紘三氏, 高橋 薫氏, 大坂公立大学の有村 龍平氏, 岩崎 葵氏に深く感謝申し上げます。

本研究は CRAFTT 実験と TA 実験なしには成り立ちませんでした。世界中の CRAFTT 実験と TA 実験の共同研究者, 関係研究機関の皆様に深く感謝します。

最後に, 研究中心での生活で, 多大なる迷惑をかけた家族にも深く感謝申し上げます。

多くの方々にお世話になりました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 藤田慧太郎, TALE 実験, 大気蛍光望遠鏡の再構成ソフトウェア開発, 大阪市立大学, 2018
- [2] T. Abu-Zayyad, et al., Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique , *Astroparticle Physics*, 61, 93, 2015
- [3] J. A. Simpson, et al., ELEMENTAL AND ISOTOPIC COMPOSITION OF THE GALACTIC COSMIC RAYS, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol.33, pp. 323 - 382, 1983
- [4] K. Ptitsyna and S. Troitsky, Physical conditions in potential accelerators of ultra-high energy cosmic rays: updated Hillas plot and radiation-loss constraints, *Phys.-Usp.* 53691, 2010
- [5] E. Fermi, On the Origin of the Cosmic Radiation, *Phys. Rev.*, 75, 1169, 1949
- [6] C. Grupen, *ASTROPARTICLE PHYSICS*, 丸善出版, 2012
- [7] M. S. Longair, *High Energy Astrophysics, Vol. 2: Stars, the Galaxy and the Interstellar Medium*, Cambridge University Press, 2008
- [8] 吉田風吾, 超高エネルギー宇宙線起源天体の種族同定解析, 2022
- [9] 柴田規迪, 次世代型極高エネルギー宇宙線観測用望遠鏡 CRAFTT に用いる光電子増倍管感面二次元不均一性の感度較正, 2022
- [10] American physical society, *Physical review D particle, fields, gravitation, and cosmology*, Volume 86, 1, July, 2012, Part1, *Physical review D*, 2012
- [11] 荻尾彰一 et al, Telescope Array による最高エネルギー宇宙線観測-兆候の発見から精密観測へ, 2019年68巻12号 p. 843-856
- [12] M. Takeda, et al., Energy determination in the Akeno Giant Air Shower Array experiment, *Astropart. Phys.* 19, 447, 2003

- [13] R.U. Abbasi, et al., First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression, Phys. Rev. Lett. 100, 101101, 2008
- [14] HiRes Collaboration, Observation of the GZK cutoff by the HiRes Experiment, Nucl.Phys.B Proc.Suppl. 196, 2009
- [15] 浜松ホトニクス, PMT について-光電子増倍管 (PMT), <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/aboutpmts.html>
- [16] 山本真周, フレネルレンズ型単眼大気蛍光望遠鏡を用いた宇宙線観測報告, 2018
- [17] 中村雄也, 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, 2021
- [18] 窪田悠人, 次世代宇宙線観測用望遠鏡の検出部構成の検討, 2022
- [19] 山本真周, フレネルレンズ型単眼大気蛍光望遠鏡の検出器シミュレーター, 2018
- [20] H. Sagawa, テレスコープアレイ実験 2013
- [21] Rene Brun and Fons Rademakers, ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389(1997)81-86. See also <http://root.cern.ch/>
- [22] cern ROOT <https://root.cern/>
- [23] 多米田裕一郎, TA 大気蛍光望遠鏡による宇宙線観測 https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/info/workshop/2013/youngscientists/2_tameda.pdf
- [24] Pierre Sokolsky, INTRODUCTION TO ULTRAHIGH ENERGY COSMIC RAY PHYSICS, 2004
- [25] Kumiko Kotera and Angela V. Olinto, "The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays", Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 49, 119-153(2011)
- [26] 西尾瑛司, CRAFFT シミュレーションを用いた宇宙線空気シャワー再構成手法の開発, 2021
- [27] 鍵谷鷹 次世代型宇宙線望遠鏡 (CRAFFT) による極高エネルギー宇宙線の再構成手法の確立, 2020
- [28] 鍵谷鷹 次世代型宇宙線望遠鏡 (CRAFFT) による極高エネルギー宇宙線の再構成手法の確立, 2019 年度卒業論文発表会, 大阪電気通信大学, 2020 年 2 月
- [29] 藤田慧太郎, TALE-FD, 2017/12/04, TA Java 解析 workshop (TALE)
- [30] R. U. Abbasi, et al., The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years, Astroparticle Physics 80, Pages 131-140, July 2016

- [31] 藤井俊博, テレスコープアレイ大気蛍光望遠鏡のためのイベント再構成ソフトウェアの開発と極高エネルギーニュートリノの探査, 2009

目次

2.1	一次宇宙線のエネルギースペクトル [1]. 縦軸は微分フラックス, 横軸はエネルギーを対数で表している. 微分フラックスとは, 積分すると宇宙線が到来した個数を示す量である.	7
2.2	一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの 3 乗を掛けたもの [2]. 縦軸は微分フラックスエネルギーの 3 乗を掛けたもの, 横軸はエネルギーを対数で表している.	7
2.3	地球で測定された宇宙線の質量組成元素量 (He-Ni) と太陽系の元素量との比較 (全て Si に対する相対値) [3]. 縦軸は相対量, 横軸は各電荷数を表している. 黒丸は $70\text{--}280 \text{ MeV } n^{-1}$ の低エネルギー, 白丸は $1000\text{--}2000 \text{ MeV } n^{-1}$ の高エネルギーの宇宙線, ダイヤは, 太陽系を表している.	10
2.4	磁気雲からの反射による粒子のエネルギー獲得の様子 [6]	12
2.5	フェルミの 2 次加速 [8].	13
2.6	フェルミの 1 次加速 [8]	15
2.7	宇宙線空気シャワーの模式図 [9]	16
2.8	TA 実験ハイブリッド観測によって得られた平均 X_{max} のエネルギー変化 [11]. 各点の上に示されている数字は, そのデータ点に寄与した観測イベント数である. 灰色の帯はこの解析での系統誤差範囲を示している.	18

3.1	HiRes 実験 (モノ解析) と AGASA 実験のエネルギースペクトル [8]. 縦軸は一次宇宙線のエネルギースペクトルのフラックスにエネルギーの 3 乗をかけたもの, 横軸はエネルギーの対数で表している. 青三角は AGASA 実験, 赤四角は HiRes-I, 黒丸は HiRes-II のエネルギースペクトルを表している. HiRes の $10^{19.8}$ eV 以上のスペクトルの落ち込みは GZK カットオフあり, $10^{18.6}$ eV の落ち込みは「Ankle」である.	21
3.2	TA 実験サイトの検出器の配置図. 四角が地表粒子検出器 (SD), 星が大気蛍光望遠鏡 (FD) を表している. , 一番北の FD は Middle Drum(MD), 南東の FD は Black Rock Mesa(BR), 南西の FD は Long Ridge(LR) と呼ばれている.	23
3.3	TA 実験におけるハイブリッド観測の概要図	24
3.4	TA 実験で用いられている SD の外観	25
3.5	TA 実験で用いられている SD の内部構造 [8].	26
3.6	光電子増倍管の原理の内部構造 [15].	27
3.7	TA 実験で用いられている FD	28
3.8	FD の全体図	28
3.9	FD ステーション	29
4.1	CRAFFT の外観.	33
4.2	CRAFFT の内部構成.	33
4.3	実際に CRAFFT が観測できた宇宙線の信号波形 (右) と TAFD のイベントディスプレイに CRAFFT の視野を重ねたもの (右) の 1 例 [16]. 左図の縦軸は ADC count, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. ADC count は光電子数のことである. 右図の縦軸は仰角, 横軸は方位角を表している. 四角形の枠は 12 台の TAFD の視野, 赤, 青, 黒, 黄色の 4 つの円は, 4 台の CRAFFT の視野をそれぞれ表している.	36
5.1	CRAFFT の設置座標を調査するために使用した航空写真 [19]. 縦軸は南北方向, 横軸は東西方向である. 紫は Black Rock にある TA-FD の位置, 緑は Black Rock にある TA-FD を円周とした際の中心, 水色は CRAFFT の位置である.	41

5.2	フレネルレンズの概要 [19]. (a) がフレネルレンズ, (b) が通常のレンズである. フレネルレンズは, (b) の灰色部分を削って厚みをなくしたレンズである.	44
5.3	CRAFFT の 3D モデル [19]	44
6.1	FD と CRAFFT の視野の重なり [23]. 長方形のような形が FD, 色付きの丸 1 つが CRAFFT それぞれ 1 台の視野, 小さな黒丸は FD が宇宙線空気シャワーを観測する際に反応した PMT を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジが CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.	47
6.2	CRAFFT が観測したイベント [19] 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.	48
6.3	Auger 実験の X_{\max} 分布 [25]	49
6.4	ジオメトリは同値でエネルギーの大きさが異なる疑似波形 [26]. 天頂角が 40 degree, 方位角が 30 degree, 落下地点 X が 9 km, 落下地点 Y が -9 km で, エネルギーが $10^{19.5} - 10^{21.0}$ までエネルギーのべきで 0.5 ずつ変化させた時の光電子数の時間変化. 縦軸は光電子数, 横軸は時間である. この疑似波形は全て CRAFFT3 が観測した宇宙線空気シャワーを再現している.	51
6.5	エネルギーと落下地点 (X, Y) は同じで到来方向が異なる疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. エネルギーは $10^{17.7}$ eV, 落下地点 X は 13.0 km, 落下地点 Y は -9.00 km で (a), (b) 共に同値である. しかし, (a) の天頂角は 0 degree, 方位角は 0 degree で, (b) の天頂角は 40 degree, 方位角は 130 degree で異なる値である.	52

6.6	エネルギーと到来方向は同じで落下地点 (X, Y) が異なる疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. エネルギーは $10^{17.7}$ eV, 天頂角は 0 deg, 方位角は 0 deg で (a), (b) 共に同値である. しかし, (c) の落下地点 X は 13.0 km, 落下地点 Y は -9.00 km で, (d) の落下地点 X は 14.0 km, 落下地点 Y は -10.00 km で異なる値である.	53
6.7	(a) は, 観測波形 [19]. (b) は, (a) の解析結果を CRAFFTjava で再現した疑似波形 [27]. 縦軸が光電子数, 横軸が時間を表している. 色は CRAFFT1 ステーションの視野を表している. 黄色が CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.	54
6.8	GSL を用いて作成した疑似ノイズの一例 [27]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である. また, ペダスタルの標準偏差 $\sigma_{P.E.} = 6.4$ である.	55
6.9	観測が期待される疑似波形 [27]. 縦軸が光電子数, 横軸が時間を表している. 色は CRAFFT1 ステーションの視野を表している. 黄色が CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である.	56
6.10	ある波形に対する S/N 比計算のイメージ [19]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.	57
6.11	CRAFFT によって検出された観測波形 [27]. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.	58
6.12	CRAFFTjava を用いて再現した様々条件の疑似波形の 2 例 [28]. どちらも縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.	59
6.13	図 6.11 と図 6.12 を比較してる様子. どちらも縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジは CRAFFT1, 黒は CRAFFT2, 青は CRAFFT3, 赤は CRAFFT4 である.	59

6.14	落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布 [28]. 縦軸は Y , 横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 黄色くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している. 赤丸は CRAFFT の位置を表している.	62
6.15	到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布 [28]. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角, カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 黄色くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示している.	63
6.16	CRAFFTjava で再現した観測が期待される疑似波形. 縦軸は光電子数, 横軸は時間を表している. 色は観測した CRAFFT を表している. オレンジが CRAFFT1, 黒が CRAFFT2, 青が CRAFFT3, 赤が CRAFFT4 である. . .	65
6.17	到来方向の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角 カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示す. . . .	66
6.18	落下地点 (X, Y) の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 縦軸は Y , 横軸は X カラーは $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している. カラーは, 青くなると, $\chi^2/\text{d.o.f.}$ が小さいことを示す. . . .	67
6.19	エネルギーの $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布. 横軸はエネルギーの大きさ, 縦軸は $\chi^2/\text{d.o.f.}$ を表している.	67
7.1	観測が期待される疑似波形の到来方向. 縦軸は天頂角, 横軸は方位角を表している.	70
7.2	観測が期待される疑似波形の落下地点. 縦軸は Y , 横軸は X , 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している.	71

- 7.3 天頂角の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0 ± 3 degree である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の天頂角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角の誤差を表している. 横軸の 1, bin は 1 degree である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 離角の解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の天頂角を表している. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の天頂角が近ければ近いほど紫の直線に集まる. 74
- 7.4 方位角の解析精度の調査の結果. 解析精度は -0 ± 3 degree である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の方位角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角または方位角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の天頂角または方位角の誤差を表している. 横軸の 1, bin は 1 degree である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形の Azimuth を表している. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の Azimuth が近ければ近いほど紫の直線に集まる. 75
- 7.5 離角の解析精度の調査の結果. 解析精度は 3 ± 2 degree である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. 縦軸はイベント数, 横軸は離角を表している. 横軸の 1 bin は 0.5 degree である. 76

- 7.6 X の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0.0 ± 0.2 km である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が Y , 横軸が X の落下地点の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の X を表したヒストグラム. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 解析精度を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の X の誤差を表している. 横軸の 1 bin は 0.1 km である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は観測が期待される疑似波形の X である. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の X が近ければ近いほど紫の直線に集まる. 78
- 7.7 Y の解析精度の調査の結果. 解析精度は 0.0 ± 0.2 km である. 0 に近ければ近いほど解析精度はよい. (a) は, 縦軸が Y , 横軸が Y の落下地点の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の Y を表したヒストグラム. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 解析精度を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は再構成できた疑似波形と観測が期待される疑似波形の X の誤差を表している. 横軸の 1 bin は 0.1 km である. 赤線はガウスフィットした結果である. (d) は, 解析精度を表した散布図. 縦軸は再構成できた疑似波, 横軸は観測が期待される疑似波形の X である. 紫の直線は傾き 1 の直線で, 再構成できた疑似波と観測が期待される疑似波形の Y が近ければ近いほど紫の直線に集まる. 79

- 8.1 天頂角の解析効率の調査の結果. 解析効率は全体的に 30% 程度である. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の天頂角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は天頂角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 5 degree である. (c) の縦軸は比, 横軸は天頂角を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 5 degree である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形の数, Entry は観測が期待される疑似波形の数である. 83
- 8.2 方位角の解析効率の調査の結果. 解析効率は 108-324 degree では 30% 以上である. (a) は, 縦軸が天頂角, 横軸が方位角の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. (b) は, (a) の方位角を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は方位角を表している. 色については (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 60 degree である. (c) は, 方位角における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は方位角を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 5 degree である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形の数, Entry は観測が期待される疑似波形の数である. 84
- 8.3 X の解析効率の調査の結果. 解析効率は 8-14, 16-17 km で約 30% 程度である. (a) は, 縦軸 Y , 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFTT, 黒線は CRAFTT の視野を表している. (b) は, (a) の X を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は X を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, X における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は X を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 1 km である. 比は, $\text{Recon}/\text{Entry}$ で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である. 86

8.4	<p>Y の解析効率の調査の結果. 解析効率は CRAFFT に近いほど良い. (a) は, 縦軸 Y, 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) の Y を表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は Y を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, Y における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は Y を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 0.1 km である. 比は, Recon/Entry で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である.</p>	87
8.5	<p>落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離の解析効率の調査の結果. 解析効率は 0-6, 7-9 km で約 30% 程度である. (a) は, 縦軸が Y, 横軸が X の到来方向の散布図. 赤は解析精度の調査に使用した観測が期待される疑似波形, 青は再構成できた疑似波を表している. 黒四角は CRAFFT, 黒線は CRAFFT の視野を表している. (b) は, (a) を落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離ごとに表したヒストグラム. 縦軸はイベント数, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離を表している. カラーについては (a) と同様である. 横軸の 1 bin は 1 km である. (c) は, 落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離における観測が期待される疑似波形と再構成できた疑似波形の比. 縦軸は比, 横軸は落下地点 (X, Y) と CRAFFT の距離を表している. 縦軸のエラーバーは統計誤差, 横軸のエラーバーは bin 幅を表している. この時, 1 bin は 1 km である. 比は, Recon/Entry で求めている. Recon は再構成できた疑似波形, Entry は観測が期待される疑似波形である.</p>	89
8.6	<p>再構成しやすい宇宙線空気シャワーの特徴. 赤のベクトルは解析精度の調査に使用した疑似波形, 青のベクトルは再構成できた疑似波で, ベクトルの向きは方位角, 長さは天頂角を表している.</p>	91
9.1	<p>各閾値における宇宙線空気シャワーのイベント数. 縦軸はイベント数, 横軸は閾値を表している. 紫点はある閾値以上全てのイベント数を示している.</p>	93

9.2	各閾値における天頂角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の天頂角の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.0T + 0.4$ であった.	94
9.3	各閾値における方位角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の方位角の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.0T + 0.2$ であった.	95
9.4	各閾値における離角の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の離角の決定精度を示している.	96
9.5	各閾値における落下地点 X の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の落下地点 X の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.00T + 0.02$ であった.	97
9.6	各閾値における落下地点 Y の決定精度. 縦軸はイベント数, 横軸は決定精度を表している. 紫点はある閾値以上の落下地点 Y の決定精度を示している. 緑線は紫点がある関数でフィッティングした結果である. フィッティングした結果, $A_{\text{Rec}} = -0.000T + 0.005$ であった.	98

表目次

4.1	CRAFFT の構成部品一覧	34
4.2	TAFD と CRAFFT のスペック比較 [31]	34
5.1	CRAFFTjava で設定している 4 台の CRAFFT 望遠鏡の座標と視野情報. X・Y 座標は, TA-FD (BRFD, Camera#0) の鏡中心の X・Y 座標に対する フレネルレンズ中心の相対座標, Z 座標は, 地表からの高さ, 方位角は, 北を 0° とした時計回りの角度. 仰角は, 水平を 0° とした角度である. [19]	42
5.2	CRAFFT 望遠鏡の構造物と各々の光学系の効果 [?]	45
6.1	観測が期待される疑似波形のパラメータと落下地点 (X, Y) の再構成のため の様々な条件の疑似波形の条件 [28]	61
6.2	観測が期待される疑似波形のパラメータと到来方向の再構成のための様々 な条件の疑似波形の条件 [28]	63
6.3	観測が期待される疑似波形作成用疑似波形のパラメータ	64
6.4	様々な条件の疑似波形の条件	65
6.5	観測が期待される疑似波形作成用疑似波形のパラメータと波形フィットの 結果	68
7.1	解析精度の調査に用いた観測が期待される疑似波形のパラメータ	70
7.2	解析精度調査のための様々な条件の疑似波形の条件	71
7.3	解析精度調査のための様々な条件の疑似波形の 1 例	72
7.4	各パラメータの目標値と解析精度	80
8.1	解析効率	90