平成 30 年度 修士論文

CTA 大口径望遠鏡高速回転電源システムの開発研究 Development of the Power System for the Fast Rotation of the CTA Large Size Telescopes

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 手嶋研究室

修士課程2年 学籍番号35-176034

久門 拓

2019年1月31日

数十 GeV を超えるエネルギーの電磁波である超高エネルギーガンマ線の観測は 1989 年 の Whipple 望遠鏡に始まった。現在は、MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS の三つの解像型大 気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) などによっ て、200 個を超える超高エネルギーガンマ線天体があることがわかっている。IACT は超高 エネルギーガンマ線天体物理学の進展のために非常に大きな役割を持つ望遠鏡である。一 般的に、X 線およびガンマ線は大気中の原子核が作る電磁場と相互作用を起こし、吸収され てしまうために、地表で直接観測することは、困難である。したがって、X 線やガンマ線の 望遠鏡は、大気の影響を受けないようにするため、地上ではなく人工衛星に搭載して観測を 行う。しかし、ガンマ線の到来頻度は、エネルギーが 10 倍高くなると到来頻度が <u>100</u> から 1000 に減ってしまうため、超高エネルギーガンマ線の観測は、人工衛星に望遠鏡を搭載し たとしても、有効面積が小さいため統計量を増やすことが難しく、したがって観測が困難で ある。IACT は超高エネルギーガンマ線が大気との相互作用で生成するチェレンコフ光を、 放物面鏡で反射・集光し、超高エネルギーガンマ線のエネルギーおよび到来方向を間接的に 測定する地上設置型の望遠鏡である。人工衛星の望遠鏡と比較して有効面積が非常に大き いため、到来頻度の低い超高エネルギーガンマ線の測定を行うことが可能となる。パルサー 星雲(Pulsar Wind Nebulae)、超新星残骸(Supernova Remnants)、活動銀河核(Active Galactic Neuclei)などの観測によって、超高エネルギーガンマ線天体は爆発現象や相対論 的速度のプラズマ流体と関連していることがわかっている。一方、似たような特徴から超高 エネルギーガンマ線天体として予言されているが、現在まで IACT での観測ができていな い天体現象として、ガンマ線バースト(Gamma Ray Burst, GRB)がある。GRB は即時放 射で瞬間的(数十ミリ秒から数百秒の間)に大量のガンマ線を放射した後、残光放射と呼ば れる、長期間にわたり様々な周波数の電磁波が減光していく様子が観測されることがわかっ ている。GRB が放射する総エネルギーは ~ 10⁵² erg から ~ 10⁵⁴ erg で、これは太陽が一 生に発する全エネルギーを上回る。また、即時放射の特徴から、即時放射の長い Long GRB と即時放射の短い Short GRB の二種に分かれる。即時放射はジェットにより引き起こさ れると考えられているが、ジェットの生成メカニズムおよび加速機構、内部エネルギーか らガンマ線即時放射への転換の機構などは不明である。この理由は、現状の望遠鏡では数 + GeV 領域の GRB 即時放射を詳細に観測することができないからである。Cherenkov Telescope Array (CTA) は既存の IACT よりも一桁以上高い感度、一桁以上広いエネルギー 範囲、広い視野、詳細な角度分解能を持つ次世代 IACT 天文台である。CTA は口径の異な る三種の望遠鏡を設置する。その中で大口径望遠鏡(Large Size Telescope, LST)はエネ ルギー閾値を 20 GeV まで下げることができるため、GRB 即時放射による>20 GeV 光子 の統計数をこれまでの 10⁴–10⁵ 倍に増やせることが期待されている。特に LST による数 + GeV 領域の測定に成功すると、より大きな観測最大エネルギー emax および、より詳細 な光度変動 δt がわかり、ジェットの Lorentz factor の下限値を $\Gamma_{\min} \propto [e_{\max}/\delta t]^{1/6}$ とよ り厳しく決定することができ、したがって即時放射の物理機構を解き明かす重要な鍵にな りうる。しかしながら、GRB 即時放射の持続時間は短く、また一様等方に飛来することが わかっているため、LST での観測のためには、GRB アラートを受けてから、高速にバース ト方向へ回転させてポインティングすることが必要不可欠である。本研究では、GRB 即時 放射を LST で測定するための、高速回転電源システムの開発を行った。本電源システムで は大電力供給機能のための蓄電・放電装置としてフライホイールを導入している。フライ ホイールは、真空容器の中に、磁力によって宙に浮いた金属が高速で回る装置で、電力を力 学的な回転エネルギーとして畜電できる。フライホイールは、内部抵抗が化学的なバッテ リーと比べ小さく、装置の大きさをコンパクトにできるほか、天文台の運用年数の間、部品 を交換せず蓄電機能を維持することができる。しかしながら、フライホイールを用いた電 源システムの、望遠鏡への実装は世界で初めてなので、詳細な試験が必要とされる。まず 停電を想定した試験を実施し、無停電電源機能が正常に作動することを確認した。無停電 電源機能中は、望遠鏡への出力に加えて余分に 7.2(5) kW の電力が必要なことがわかった。 続いて、高速回転時に推定される出力電力は 300 kW にまで及ぶことが計算によりわかっ た。また、減速時に発生する回生電力は方位角で 130 kW だとわかった。疑似負荷を用い て大電力供給試験を実施し、機能が正常に作動することを確認して、さらに望遠鏡への出 力とフライホイールの消費電力の関係式を導出した。試験結果から、電源システムの各装 置への負荷を計算し、正常に高速回転を行うための条件を確定した。開発した高速回転電 源システムによって、Long GRB のうち 50% に対して、即時放射中に高速回転によるポイ ンティングを完了できることがわかった。この結果から、LST が Long GRB の即時放射を 2か月に一度くらいの頻度で観測できることが期待される。今後の展望としては、疑似負荷 ではなく、実際に LST を用いた高速回転試験を行うことで、電力の計算に用いた望遠鏡の モデルを改良することが期待される。また、今回構築した一時的なモニタリングシステム に関する知見は、今後実際の観測運用のための永続的なモニタリングシステムの実装の際 に有用となりうる。LST の観測が開始され、Long GRB の即時放射を検出できるようにな ると、GRB の即時放射が従う超高エネルギーガンマ線天体物理学がさらに拓かれていくこ とが期待される。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	【目的】超高エネルギーガンマ線天体物理学とガンマ線バースト	7
2.1 2.2	超高エネルキーカンマ緑大文子および大体初連子 解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Tele-	1
	scope, IACT)	15
2.3	ガンマ線バースト(Gamma Ray Burst, GRB)	23
2.4	IACT によるガンマ線バースト観測の必要性および課題	36
第3章	【装置概要】Cherenkov Telescope Array と大口径望遠鏡	41
3.1	Cherenkov Telescope Array (CTA)	41
3.2	大口径望遠鏡(Large Size Telescope, LST)	44
第4章	【装置詳細】大口径望遠鏡高速回転電源システム	49
4.1	高速回転のための電源システムの必要性	49
4.2	電源システム全体像	51
4.3	無停電電源装置(Uninterruptible Power Supply, UPS)	52
4.4	フライホイール(Flywheel)	52
4.5	モニタリングシステム	53
4.6	ドライブシステム(電源システム外部)	54
第5章	【結果 a】停電状況を想定した無停電電源機能試験	57
5.1	停電試験内容	57
5.2	停電試験結果	58
5.3	得られた知見....................................	61
5.4	まとめ	62
第6章	【結果 b】望遠鏡高速回転における最大電力の推定	65

v

6.1	章の流れ	65
6.2	望遠鏡の回転挙動定義...............................	66
6.3	回転エネルギー時間変化率	67
6.4	摩擦によるエネルギー時間変化率..........................	70
6.5	望遠鏡高速回転に必要な仕事率.........................	73
6.6	望遠鏡にかかるトルク..............................	74
6.7	回生電力および回生エネルギー..............................	75
6.8	高速回転中、電源システムが供給すべき総仕事率	79
6.9	向かい風ではなく追い風条件での回生電力および回生エネルギー.....	80
6.10	まとめ	82
第7章	【結果 c】望遠鏡高速回転を想定した大電力供給機能試験	83
7.1	擬似負荷と試験セットアップ	83
7.2	試験内容	86
7.3	誤差の議論	86
7.4	フライホイール消費電力の導出..............................	89
7.5	電源システム出力電力とフライホイール合計消費電力の関係	90
7.6	まとめ	92
第8章	【結果 d】高速回転時に予見される望遠鏡装置群の振る舞い	95
8.1	「高速回転」の定義..............................	95
8.2	望遠鏡のポインティング完了時間........................	96
8.3	UPS	97
8.4	フライホイール	99
8.5	減速用抵抗装置	100
8.6	望遠鏡モーターにかかる負荷	104
8.7	回転中に望遠鏡にかかる力	106
8.8	まとめ	109
第9章	【結果 e】高速回転を実行するための条件確定	111
9.1	最大角加速度と最大角速度の確定................	112
9.2	【高速回転禁止】フライホイールエネルギー不足時	113
9.3	【緊急停止】回転中の想定外な挙動	115
9.4	【高速回転禁止】無停電電源モード状態	115
9.5	【高速回転禁止】非常用発電機モード状態かつ燃料不足時	116
9.6	【高速回転制限】一方のフライホイール故障時	116

9.7 9.8	【高速回転禁止】高速回転後の数十秒間	116 117
9.9	【注意】温度に関すること	117
9.10	まとめ	120
第 10 章	【議論】高速回転によるガンマ線バースト即時放射の観測可能性	123
10.1	章の流れ.................................	123
10.2	【確率密度分布】通常運転時の望遠鏡観測角度分布	124
10.3	【確率密度分布】GRB 到来角度分布	128
10.4	【確率密度分布】GRB 到来時における回転角度分布	129
10.5	【確率密度分布】望遠鏡回転所要時間分布	131
10.6	【確率密度分布】GRB 発生から望遠鏡回転までの所要時間分布	136
10.7	GRB 即時放射の観測可能性	138
10.8	まとめ	139
第 11 章	まとめと今後の展望	143
Appendi	x	145
А	三号機、四号機の疑似負荷試験............................	145
В	瞬間風速の計算	145

А	三号機、四号機の疑似負荷試験	
В	瞬間風速の計算	
С	効率の計算	
D	LST 構造体資料	
Е	電源システムに関する資料151	
謝辞	163	

図目次

1.1	異なる周波数の電磁波で観測した銀河面の画像	1
1.2	異なる周波数の電磁波で観測したカニ星雲の画像	2
1.3	エネルギーと電磁波の種類の関係...............	3
1.4	ガンマ線バーストの放射概念図	4
1.5	20 秒以内に大口径望遠鏡を回転させるとき、電源システムが供給しなけ	
	ればならない電力の時間変化	5
2.1	現在見つかっている超高エネルギーガンマ線天体	8
2.2	かにパルサーのエネルギーフラックス(Polar-Cap の棄却)	9
2.3	かにパルサーのエネルギーフラックス(Slot-Gap, Outer-Gap の棄却)	10
2.4	カニ星雲のエネルギーフラックス.................	11
2.5	超新星残骸 RX J1713.7-3946 のエネルギーフラックス	12
2.6	超新星残骸 Tycho のエネルギーフラックス	12
2.7	活動銀河核の概念図...............................	14
2.8	ブレーザーのエネルギーフラックス	15
2.9	ガンマ線による電磁シャワーの模式図	16
2.10	電磁シャワーとハドロンシャワーの違い	18
2.11	チェレンコフ光の放射概念図	19
2.12	シャワー粒子速度とチェレンコフ放射角の関係	20
2.13	電磁シャワーによる地表でのチェレンコフ光子密度分布のエネルギー依存性	21
2.14	IACT によるチェレンコフ光観測の概念図	22
2.15	GRB 990123 のスペクトル	24
2.16	BATSE による GRB 光度曲線の測定データ例	26
2.17	ピークエネルギー $E_{\rm p}$ と最大光度 $L_{\rm p}$ の関係	27
2.18	Long GRB, Short GRB の持続時間およびピークエネルギーの違い	28
2.19	ガンマ線バーストの放射概念図	29

2.20	可視光残光放射の光度曲線	30
2.21	火の玉モデルによるジェット加速の効果	34
2.22	Fermi 望遠鏡による GRB の観測例	36
2.23	GRB 到来方向分布	38
2.1		40
3.1	エネルキー領域ことの各望遠鏡の感度	42
3.2	LSI, MSI, SSI の配直図	43
3.3	CTA の元成 予想図	43
3.4		44
3.5	短時間測定における、CTA および Fermi 望遠鏡の感度比較	45
3.6	LST のエネルギー領域における GRB エネルギーフラックスのシミュレー	
	ション	46
41	フライホイールの図	50
4.1	システム全体図	51
т.2 Л З	構筑したモニタリングシステムの図	54
т.5	$H_{\mathcal{R}} C_{\mathcal{L}} C C C C C C C $	54
5.1	停電試験のセットアップ	58
5.2	停電試験結果	59
5.3	停電試験結果のフィッティング...............................	60
5.4	長時間の電源システム出力変化	62
6.1	LST の回転挙動を示した図	66
6.2	LST の回転エネルギー時間変化率	68
6.3	LST の転がり摩擦によるエネルギー変化率	69
6.4	LST 構造体のモデル図	71
6.5	LST の摩擦によるエネルギー変化率	72
6.6	LST 高速回転に必要な仕事率	74
6.7	高速回転で LST にかかるトルク	75
6.8	回生電力および回生エネルギー(向かい風)...........	76
6.9	電源システムが供給すべき高速回転のための仕事率	77
6.10	電源システムが供給すべき電力	78
6.11	向かい風条件との変更点	80
6.12	回生電力および回生エネルギー(追い風)............	81
6.13	電源システムが供給すべき電力および減速時の回生電力........	82

7.1	試験に用いた擬似負荷の図 84
7.2	大電力供給試験のセットアップ
7.3	大電力供給試験の様子
7.4	大電力供給試験結果の例
7.5	試験結果の誤差を示した図 88
7.6	エネルギー減少スロープおよびフライホイール一つあたりの消費電力 89
7.7	フライホイール合計の消費電力(コンテナ二号機)
7.8	フライホイール合計の消費電力(全コンテナ)
8.1	各条件ごとの LST の回転挙動を示した図 96
8.2	最大角速度と最大角加速度の制限域の図
8.3	LST のポインティング完了時間 98
8.4	LST が電源システムに要求する最大電力
8.5	LST が電源システムに要求する、高速回転中の電気エネルギー100
8.6	高速回転後のフライホイールのエネルギー残量
8.7	減速時の最大回生電力
8.8	減速時の回生エネルギー102
8.9	回生エネルギー消費後の抵抗装置挙動
8.10	回生エネルギー消費後に必要な待ち時間
8.11	LST のモーターにかかる最大電力
8.12	LST のモーターにかかる最大トルク
8.13	変数および軸の定義
9.1	UPS 出力上限および回生電力と回生エネルギーの上限図
9.2	UPS 出力上限およびモーター定格電力とモーター定格トルクの図 112
9.3	LST 高速回転中に予想されるエネルギー残量の変化
9.4	温度と真空度の関係
9.5	数日にわたる長時間のフライホイールが示す挙動
9.6	試験を実施したある日のエネルギーコンテナの温湿度
10.1	GRB アラート受信前の方位角に関する確率密度分布
10.2	仰角に関する挙動
10.3	様々な μ_i 、 σ_i の条件での方位角確率密度分布の例
10.4	GRB アラート受信前の天頂角に関する確率密度分布
10.5	GRB の到来分布
10.6	GRB の到来天頂角ヒストグラム

10.7	GRB の到来天頂角に関する確率密度分布
10.8	GRB ポインティングの方位角回転角度に関する確率密度分布131
10.9	GRB ポインティングの天頂角回転角度に関する確率密度分布132
10.10	GRB ポインティング時における「大きい」方の回転角度に関する確率密
	度分布
10.11	GRB ポインティング時の回転角度と回転所要時間の関係
10.12	回転角度の大きさごとの LST の回転挙動を示した図
10.13	GRB ポインティングの回転所要時間に関する確率密度分布136
10.14	GRB 発生後からポインティング完了までの時間に関する確率密度分布 137
10.15	GRB ポインティング確率と GRB 統計量との比較
10.16	GRB ポインティング確率と Long GRB 統計量との比較 140
A.1	大電力供給試験結果の例(コンテナ三号機)
A.2	大電力供給試験の様子(コンテナ三号機)
A.3	大電力供給試験結果の例(コンテナ四号機)
C.1	歯車に関する情報
C.2	減速機に関する情報
D.1	LST の方位角および仰角の慣性モーメントについてまとめた資料 152
D.2	LST の総重量についてまとめた資料153
D.3	LST の回転構造体の重量についてまとめた資料
E.1	電源システムの単線結線図(常用電源、非常用発電機および ATS) 155
E.2	電源システムの単線結線図(エネルギーコンテナ内全体図)156
E.3	電源システムの単線結線図(エネルギーコンテナ内詳細:エアコン) 157
E.4	電源システムの単線結線図(エネルギーコンテナ内詳細:その他システム) 158
E.5	モニタリングシステムのネットワーク接続図

表目次

2.1	ジェット速度 Γ の下限値	32
3.1	CTA に配置される LST、MST、SST の性能	44
8.1	カメラ構造体にかかる力(単位 ton 重)	108
8.2	カメラ構造体に加わる加速度(重力定数で規格化)	108

第1章

はじめに

超高エネルギーガンマ線天体物理学の研究では、宇宙から到来する電磁波の種類のうち 最もエネルギーの高いガンマ線の中でも、特に、高エネルギー領域のガンマ線を用いて物理 機構の研究を行う。天体物理学を議論するためには、より高感度の望遠鏡を用いた天体観 測を行うことが必要である。



図 1.1 異なる周波数の電磁波で観測した銀河面の画像。https://www. cta-observatory.org/science/gamma-rays-cosmic-sources/より引用。電 波からガンマ線までの画像を上から順に示す。



図 1.2 異なる周波数の電磁波で観測したカニ星雲の画像。"Composite"は X 線の画像 を青色、可視光の画像を赤と黄色、赤外線の画像を紫色で重ね合わせた画像である。【画 像】 [Radio] NRAO/AUI and M. Bietenholz; [Infrared] NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn.; [Optical] NASA/ESA/ASU/J.Hester & A.Loll; [UV] NASA/Swift/E. Hoversten, PSU; [X-ray and composite] NASA/CXC/SAO

天体観測と表現しても、天体はどの周波数の電磁波で観測するかによって、その見た目が 異なる。例えば、図 1.1 と図 1.2 が示しているのは、異なる周波数の電磁波を用いて測定し た銀河面とカニ星雲の結果である。

その中でも、超高エネルギーガンマ線は図 1.3 で示すように、数十 GeV を超えるエネル ギーを持つガンマ線である。様々な種類の電磁波の中でも、超高エネルギーガンマ線は、観 測が非常に難しい電磁波であった。

X線やガンマ線は、到来しても大気中の原子核との相互作用で吸収されてしまうため、人 工衛星を用いて観測されてきた。しかしながら、超高エネルギーガンマ線は到来頻度が極 端に低いため、人工衛星の限られた有効面積では測定することが困難であった。

この問題を解決したのが、解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)である。超高エネルギーガンマ線は、エネルギーが非常 に高いので、大気に入射すると原子核との相互作用によって、チェレンコフ光が地表まで届 く。これを測定することで、超高エネルギーガンマ線天体を観測することができる。IACT



図 1.3 エネルギーと電磁波の種類の関係。https://www.cta-observatory.org/ science/gamma-rays-cosmic-sources/の図を改変。エネルギーの小さい(つまり 波長の長い、もしくは周波数の小さい)順に、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガ ンマ線。超高エネルギーガンマ線は、ガンマ線の中でもエネルギーが数十 GeV を超え るものである。CTA は超高エネルギーガンマ線を測定するための、次世代の解像型大気 チェレンコフ望遠鏡である。

の有効面積は、チェレンコフ光が降り注ぐ地表の領域*¹によって決まる。超高エネルギーガ ンマ線は到来頻度が少ないということを述べたが、IACT ではその広大な有効面積によっ て、超高エネルギーガンマ線の測定が可能になる。

超高エネルギーガンマ線天体物理学の進歩は、IACT の進展と密接に関連している。超高 エネルギーガンマ線天体は、これまでにパルサー星雲、超新星残骸、活動銀河核など、200 個を超える天体が観測され、爆発現象や相対論的速度で運動するプラズマ流と関連してい ることがわかってきた。一方、同様の特徴から超高エネルギーガンマ線天体として予言さ れているが、現在まで IACT での観測ができていない天体現象として、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst, GRB) がある。GRB は銀河系外で発生する突発現象で、数十ミリ秒 から数百秒という瞬間に、大量のガンマ線を放射する。これは GRB の即時放射と呼ばれ る。GRB によって放射される総エネルギーは、~10⁵² erg から~10⁵⁴ erg で、太陽が一生 に発する全エネルギーを上回る。図 1.4 で示すように、GRB の放射は相対論的速度で運動 するプラズマ流によって引き起こされると考えられている。しかしながら、どのように即 時放射が引き起こされているかはわかっていない。その理由は、既存の望遠鏡では、GRB 即時放射からの超高エネルギーガンマ線を、精度よく測定できないからである。

この研究は、次世代 IACT 天文台である Cherenkov Telescope Array (CTA) に設置され



図 1.4 ガンマ線バーストの放射概念図。第 2 章の図 2.19 を引用している。ガンマ線 バーストは即時放射 (Prompt Emission) で瞬間的に大量のガンマ線を放射した後、残光 放射 (Afterglow) で、電波からエネルギーの低いガンマ線を放射する (e.g. Costa et al. 1997; van Paradijs et al. 1997)。残光放射は時間のべき関数で徐々に減光する。残光放射 の観測によって GRB の距離と位置を正確に求められる (Metzger et al. 1997)。GRB は 等方放射現象ではなく、狭い立体角に絞られた放射だと考えられている。ジェットが内部 衝撃波および外部衝撃波を形成し、それぞれ即時放射と残光放射を引き起こす (e.g. Piran 1999)。GRB は Long GRB および Short GRB の二種に分けられる (e.g. Shahmoradi 2013a)。Long GRB は大質量星の重力崩壊によって引き起こされる現象だと考えられて いる (Hjorth et al. 2003)。Short GRB は中性子星連星の合体が引き金になっていると言 われている (e.g. Abbott et al. 2017)。

る大口径望遠鏡を用いて、GRB 即時放射を測定するための、電源システムに関する開発を 目的としている。

GRB 即時放射を測定するためには、人工衛星からの GRB アラートを受けてから、大口 径望遠鏡を高速でバースト方向に向けることが必要不可欠である。高速でポインティング を行うためには、図 1.5 が示すように、~ 300 kW の大電力を供給するシステムを構築する 必要がある*²。それを実現するために、大口径望遠鏡の電源システムは、世界で初めて望遠 鏡システムに、蓄電装置としてフライホイール*³を搭載している。フライホイールを用いた 大電力供給機能および、停電時にも対応するための無停電電源機能が、正常に動作するよう

^{*2} 図 1.5 の計算手法は第6章で示す。

^{*3} フライホイールの詳細は第4章参照。



図 1.5 20 秒以内に大口径望遠鏡を回転させるとき、電源システムが供給しなければな らない電力の時間変化。第6章の図 6.13(a) を引用している。最大時には 300 kW にま で達する。

な電源システムを実装するべく、開発研究を行った。

以上の事柄について、この論文では次の構成で述べる。

【第2章】目的

第2章では、超高エネルギーガンマ線天体や解像型大気チェレンコフ望遠鏡の概説を行 う。この論文の目的である、ガンマ線バーストについての詳説や、測定のための課題につい て述べる。

【第3章および第4章】 装置解説

第3章では、ガンマ線バーストの即時放射を詳細に測定するための、CTA 大口径望遠鏡 の説明を行う。第4章では、開発研究を行った高速回転電源システムについて述べる。 こ の電源システムは、世界で初めて望遠鏡にフライホイールを搭載している。

【第5章から第9章まで】結果

第5章では、電源システムの無停電電源機能に関する、試験結果について述べる。第6 章では、大口径望遠鏡の高速ポインティングの際に推定される最大電力について計算する。 第7章では、電源システムの大電力供給機能に関する、フライホイールを用いた放電試験 の結果を述べる。第8章では、高速ポインティングの実行中に、それぞれの装置にかかる 電力負荷などについて論ずる。第9章では、観測中に高速ポインティングを実行するため の条件について述べる。

【第 10 章】議論

第10章では、開発した高速回転電源システムによって、ガンマ線バーストの即時放射を 実際にどの程度観測できるようになるのかということを議論する。

【第11章】まとめと今後の展望

第11章では、この論文の総括を行う。また今後の展望について述べる。

第2章

【目的】

超高エネルギーガンマ線天体物理学 とガンマ線バースト

2.1 超高エネルギーガンマ線天文学および天体物理学

ガンマ線とは、~100 keV を超えるエネルギーの電磁波である。そのうち、さらに数十 GeV を超えるエネルギーの電磁波は、超高エネルギーガンマ線と呼ばれる。

超高エネルギーガンマ線天文学は、解像型大気チェレンコフ望遠鏡によって始まった天 文学である。超高エネルギーガンマ線天体を初めて発見したのは、1989 年の Whipple 望 遠鏡である。Whipple 望遠鏡はカニ星雲が ~ 1 TeV で輝いていることを示した (Weekes et al. 1989)。図 2.1 は、これまでに発見されている、超高エネルギーガンマ線天体につい てまとめた、TeVCat (Wakely & Horan 2008)の情報を示したものである。TeVCat による と、今では MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS の三つの解像型大気チェレンコフ望遠鏡などに よって、200 個を超える超高エネルギーガンマ線天体があることがわかっている。

現行の三つの解像型大気チェレンコフ望遠鏡により、現在、超高エネルギーガンマ線天体 としてわかっている天体は

- パルサー星雲 (Pulsar Wind Nebulae)
- 超新星残骸 (Supernova Remnants)
- 活動銀河核(Active Galactic Neuclei)

などがある*1。これらの主要な超高エネルギーガンマ線天体について現在わかっているこ

^{*1} 他にも、ガンマ線連星、星形成銀河、大質量星連星などがある。



図 2.1 現在見つかっている超高エネルギーガンマ線天体。http://tevcat. uchicago.edu より引用。【水色領域】北半球に設置されている MAGIC 望遠鏡お よび VERITAS 望遠鏡の観測可能領域。【桃色領域】南半球に設置されている H.E.S.S 望 遠鏡の観測可能領域。銀河中心は拡大して表現している。2019 年 1 月 2 日現在、245 天 体が見つかっている。そのうち、~ 70% が MAGIC 望遠鏡、H.E.S.S. 望遠鏡、VERITAS 望遠鏡によって発見されている。

とを解説する。

■パルサー星雲(Pulsar Wind Nebulae)

パルサー星雲を説明する前に、パルサーについて説明する。

パルサーは周期的なパルスを放射する天体で、その正体は、~ 10¹² G もの強い磁場をも ち、数ミリ秒から数秒の周期で高速に自転する中性子星である。強く磁化した星が高速回 転することで、巨大な誘導起電力が引き起こされ、荷電粒子が加速され、星の周りに磁気 圏が形成される(Goldreich & Julian 1969)。加速された粒子によるパルサーの放射場所は、 候補として、

- 星の極近傍だとする Polar-Cap 説 (Ruderman & Sutherland 1975; Daugherty & Harding 1982)
- 磁気圏の外側だとする Slot-Gap 説(Harding et al. 2008) もしくは Outer-Gap 説 (Cheng et al. 1986)

が挙げられていた。ガンマ線はあるエネルギー閾値を超えると、磁場の影響を受けて吸収 されてしまう。もし Polar-Cap 説が正しいとすると、放射領域の磁場がより強いために、



図 2.2 かにパルサーのエネルギーフラックス (Polar-Cap の棄却)。Aliu et al. (2008) より引用。図中の大きな黒い四角で表現されているのが、MAGIC によって測定に成功 した 25 GeV の結果である。これによって、ガンマ線の放射領域は Polar-Cap ではない ということが示された。

他説と比較すると、スペクトルの高エネルギー側で、指数関数より急激な減衰が見られる (Daugherty & Harding 1996)。Aliu et al. (2008)によれば、MAGIC 望遠鏡がカニパル サーの測定に成功した結果から、図 2.2 が示すように、指数関数より急激な減衰が見られな かったことがわかった。すなわち、ガンマ線の放射領域は Polar-Cap ではないということ が示された。

その後、VERITAS 望遠鏡でもカニパルサーの観測に成功し、より高いエネルギーでのスペクトルがわかってきた。Aleksić et al. (2011)によれば、図 2.3 が示すように、指数減衰の挙動が見られず、従来考えられていた Slot-Gap 説や Outer-Gap 説では放射機構の説明ができないことがわかった。

パルサーの中で今までに超高エネルギーガンマ線の放射が発見されたのは、カニパルサー (VERITAS Collaboration et al. 2011; Aleksić et al. 2011)とベラパルサー(H. E. S. S. Collaboration et al. 2018)だけである。一方で、パルサーの周囲に広がるパルサー星雲は、超 高エネルギーガンマ線天体として、現在~40天体が観測されている。パルサー星雲は、パ ルサーから放出されるパルサー風が、パルサーの周りの物質と相互作用して輝く星雲であ



図 2.3 かにパルサーのエネルギーフラックス (Slot-Gap, Outer-Gap の棄却)。Aleksić et al. (2011)より引用。Aliu et al. (2008)の測定の後、かにパルサーの観測に VERITAS も成功し、さらに高エネルギー領域のスペクトルもわかってきた。黒い点が Fermi、赤 い点が MAGIC、空白の四角が VERITAS である。黒線が従来考えられていた指数減衰 のモデルでフィッティングを行った結果である。図からもわかるように、従来考えられ ていた Slot-Gap 説や Outer-Gap 説では超高エネルギーガンマ線の放射機構の説明がで きないことがわかった。

る (e.g. Gaensler & Slane 2006)。パルサーのエネルギー損失は、パルス放射による損失よ りも相対論的速度のプラズマ流によるエネルギー損失の方が支配的である。パルサー風は、 周りの物質との相互作用で衝撃波を生成する。ここで粒子の加速が起こり、シンクロトロ ン放射によって、電波から X 線までの電磁波が放射される (Rees & Gunn 1974)。一方、ガ ンマ線は逆コンプトン散乱により放射される (Atoyan & Aharonian 1996)。例えば、図 2.4 にカニ星雲のスペクトルを示す。左の山はシンクロトロン放射、右の山はシンクロトロン 放射がさらに逆コンプトン散乱されたスペクトルによって説明される (Tanaka & Takahara 2010)。このように、スペクトルに関する観測による知見は、すでにいくつか得られている が、パルサー星雲の空間構造に関することは、まだよくわかっていない点が多く、角度分解 能の高い観測が必要である (Ishizaki et al. 2017)。



図 2.4 カニ星雲のエネルギーフラックス。Tanaka & Takahara (2010)より引用。左の 山はシンクロトロン放射で説明される。右の山はシンクロトロン放射がさらに逆コンプ トン散乱されたスペクトルによって説明される(Tanaka & Takahara 2010)。

■超新星残骸(Supernova Remnants)

超新星残骸とパルサー星雲は、銀河系内で見つかる主要な超高エネルギー天体である。 超新星残骸は、超新星爆発で吹き飛ばされた星の外層によって作られた天体である。吹き 飛ばされた外層は、周りの星間物質との間に衝撃波を形成する。超新星残骸 SN1006 の衝 撃波からは、シンクロトロンによる X 線放射が観測された。この結果から、Koyama et al. (1995) は、X 線の放射が、衝撃波で加速されてエネルギーを得た電子からのシンクロトロ ン放射で説明ができることを示した。

超新星残骸は超高エネルギーガンマ線天体で、現在 ~ 30 天体が見つかっている。超新星 残骸の超高エネルギーガンマ線放射の由来は、まだわかっていない。放射の過程としては、

- レプトニックモデル
- ハドロニックモデル

の二つが考えられている。前者は、電子による逆コンプトン散乱によって、宇宙マイクロ波 背景放射(Cosmic Microwave Background, CMB)が、超高エネルギーガンマ線のエネル



図 2.5 超新星残骸 RX J1713.7-3946 のエネルギーフラックス。Abdo et al. (2011a)よ り引用。RX J1713.7-3946 の Fermi と H.E.S.S による観測データを点で示す。【左】レ プトニックモデルに従う放射としたときのエネルギーフラックスを線で示す。【右】ハド ロニックモデルに従う放射としたときのエネルギーフラックスを線で示す。レプトニッ クモデルの方が観測結果をより再現する。



図 2.6 超新星残骸 Tycho のエネルギーフラックス。Giordano et al. (2012)より引用。 広いエネルギー範囲にわたる Tycho の観測データを点で示す。特に、高エネルギー側の 結果は Fermi と VERITAS によるものである。【左】レプトニックモデルに従う放射と してフィットした場合。【右】ハドロニックモデルに従う放射としてフィットした場合。 ハドロニックモデルの方がより観測結果に近いことがわかる。

ギーまで叩き上げられるというモデルである。この場合は、超高エネルギーガンマ線は X 線と同じく電子由来である。後者は、加速された陽子が、周囲の分子雲などの原子核と相互 作用するときに発生する π⁰ の崩壊によって、ガンマ線が放出されるというモデルである。

前者と後者はスペクトルに違いが見られる (e.g. Giordano et al. 2012)。コンプトン散乱 の散乱断面積を決める Klein-Nishina の式によって、光子のエネルギーが電子の静止エネ ルギーより大きくなると、散乱断面積が E^{-1} で減衰する (e.g. Rybicki & Lightman 1986)。 この効果により、レプトニックモデルが正しいとすると、観測者の系で測定されるスペクト ルは数十 TeV を過ぎると急激に折れ曲がる。一方で、ハドロニックモデルのプロセスに関 しては、pp 反応の散乱断面積のエネルギー依存性が弱い(Nakamura 2010)ため、急激な折 れ曲がりは見られない。このスペクトルの特徴から、Abdo et al. (2011a) は、図 2.5 に示 すように、ある超新星残骸 RX J1713.7-3946 については、レプトニックモデルの方が観測 をより再現することを示した。しかし、Giordano et al. (2012) は、別の超新星残骸 Tycho の観測結果 (図 2.6) から、ハドロニックモデルの方がより観測結果に近いことを提唱して いる。

また、超新星残骸の空間分布に注目して、Aharonian et al. (2007) は、RX J1713.7-3946 の超高エネルギーガンマ線の放出領域が、X 線放射領域と似ているという事実から、電子 由来、つまりレプトニックモデルだという結論を示そうとしたが、それを行うには、現行の 解像型大気チェレンコフ望遠鏡の角度分解能が不十分であった。このように、この問題に ついては、角度分解能が悪いために、まだ議論の余地がある。

■活動銀河核(Active Galactic Neuclei)

超高エネルギーガンマ線を出す天体は、活動銀河核からもこれまでに~80 天体見つ かっている。パルサー星雲や超新星残骸は銀河系内に存在するが、活動銀河核は銀河系外 で見つかる。その正体は銀河の中心に位置する、大質量ブラックホールだと考えられてい る(Robson 1996)。ブラックホールの周りに物質が降着し、その物質が重力エネルギーを 解放することで非常に明るく輝く。図 2.7 が示すように、降着円盤の垂直方向には、相対論 的速度で動くジェットと呼ばれるプラズマの流れが存在している。

特にそのジェットが、観測者の視線方向に対して正面を向いているものはブレーザーと 呼ばれる。超高エネルギーガンマ線天体の大部分を占めるのがブレーザーである。ブレー ザーは数分から数時間の間に大きな変動をすることがわかっており、これはフレアと呼ば れる(Albert et al. 2007)。

図 2.8 は典型的なブレーザーである Mrk 421 のスペクトルを表示している。左側の電波 から X 線領域のスペクトルは電子シンクロトロン放射によるものであり、右側の超高エネ ルギーガンマ線にかけてのスペクトルは、ジェットによる逆コンプトン散乱によるものだ という解釈がされている (Inoue & Takahara 1996)。

しかしながら、どのようにしてジェットが出ているのか、およびどのようにフレアが発生 するのかに関しては、まだわかっていない。

■超高エネルギーガンマ線天体物理学

現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡によって、今では、超高エネルギーガンマ線天体 をただ発見するだけでなく、そこでの詳細な物理機構の一部を解明できるようになってき

^{*} $^{2}\nu F_{\nu}$ の定義は、図 2.15 参照。



図 2.7 活動銀河核の概念図。https://www.pinterest.jp/pin/ 428404983293505362/より引用。活動銀河核の中心には大質量ブラックホー ルがあると考えられている(Robson 1996)。ブラックホールの周りにある降着円盤が重 カエネルギーを解放することで非常に明るく輝く。降着円盤の垂直方向には、ジェット が存在する。ジェットが観測者の視線方向に対して正面を向いているものはブレーザー と呼ばれ、現在見つかっている超高エネルギーガンマ線天体の大部分を占める。

た。このように、超高エネルギーガンマ線が「どこで、どのような物理機構によって放射さ れるのか」解明する学問を超高エネルギーガンマ線天体物理学という。

上で述べてきたように、超高エネルギーガンマ線天体物理学の進歩は、解像型大気チェレ ンコフ望遠鏡の進展と大きく関係している。現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡によっ て、新しい天体物理学の知見を得ることができた一方で、また新たな謎も発見された。

超高エネルギーガンマ線天体物理学のより正確で詳細な理解のために、次世代の望遠鏡 で改善すべき点は、



10th 10th

線にかけての山は、ジェットによる逆コンプトン散乱によるものだという解釈がされている(Inoue & Takahara 1996)。特に右側の山の特徴を決定付けるのには、解像型大気 チェレンコフ望遠鏡 MAGIC が大きな役割を果たしている。

- 感度の向上
- エネルギー分解能の向上
- 角度分解能の向上
- 視野の拡大
- ポインティング速度の高速化

などである。

2.2 解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)

2.1 節では、超高エネルギーガンマ線天体と、天体の放射に関わる物理学について説明してきた。この節では、それらの進展のために非常に大きな役割を持つ、解像型大気チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)の検出原理の概要を説明



図 2.9 ガンマ線による電磁シャワーの模式図。http://www.thelivingmoon.com/ 45jack_files/03files/HAWC_and_the_Future.html より引用。非常にエネル ギーの高いガンマ線が入射すると、電子陽電子を対生成する。対生成した電子陽電 子はガンマ線を制動放射する。これが連鎖的に起こることで、荷電粒子のカスケードが 発生する。これを電磁シャワーという。入射するガンマ線のエネルギーが高いほど、電 磁シャワーは大きく成長する。

する。

一般的に、地球上から X 線およびガンマ線を直接観測することは、困難である。それは、 入射してきた電磁波が、大気中の原子核が作る電磁場と相互作用を起こし、地上に到達する 前に吸収されてしまうからである。したがって、X 線やガンマ線の望遠鏡は、大気の影響 を受けないようにするため、地上ではなく人工衛星に搭載して観測を行う。

しかしながら、超高エネルギーガンマ線ほどエネルギーが高い電磁波は、人工衛星に望 遠鏡を搭載したとしても観測が困難である。なぜなら、ガンマ線の到来頻度はべき乗則に したがい、エネルギーが 10 倍高くなると到来頻度が <u>100</u> から <u>1000</u> に減ってしまう*³ため、 有効面積が小さい人工衛星サイズの望遠鏡では、観測できるガンマ線の統計量を増やすこ とが難しいからである。

IACT は、超高エネルギーガンマ線を測定するために開発された地上設置型の望遠鏡である。以下のような過程を経て超高エネルギーガンマ線を測定する。

■電磁シャワー

超高エネルギーガンマ線は、大気中の原子核がつくる電磁場との相互作用で、電子陽電 子を対生成する。

$$\gamma + A \longrightarrow e^- + e^+ + A \tag{2.1}$$

ここで A は大気中の原子核(例えば窒素)である。電子と陽電子は、元のガンマ線のエネ ルギーを二つに分け合う。発生した電子陽電子は、続いて大気の原子核の電場で曲げられ ることでガンマ線を制動放射する。

$$e^{\pm} + A \longrightarrow e^{\pm} + \gamma + A \tag{2.2}$$

ガンマ線のエネルギーが高いうちは、図 2.9 に示すように、式 (2.1),式 (2.2)の反応が連鎖 的に起き、大量の電子陽電子が生成される。この荷電粒子のカスケードを電磁シャワーと いう。荷電粒子の数が増えると、個々の荷電粒子の持つエネルギーが次第に下がっていく。 荷電粒子のエネルギーが臨界エネルギー(大気中では ~ 85 MeV)*5まで下がると、制動放 射よりも電離損失の効果が支配的になり、荷電粒子は大気中で吸収されてしまう。この結 果、電磁シャワーは減衰し始める。したがって、生成される荷電粒子の量は入射する一次 ガンマ線のエネルギーが高いほど多くなる。300 GeV の超高エネルギーガンマ線の入射に よってつくられる電磁シャワーのシミュレーション計算結果を図 2.10 (左)に示す。

^{*&}lt;sup>3</sup> http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html 参照。

^{*4} https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/~bernlohr/mpik/report/report-without-chapter11.
pdf

^{*&}lt;sup>5</sup> 臨界エネルギーの定義は1 放射距離(X₀) あたりの電離損失エネルギーである。放射距離は、制動放射に よって、電子陽電子の持つエネルギーが1/e となる距離で定義される。標準状態の大気では X₀ ~ 330 m。



図 2.10 電磁シャワーとハドロンシャワーの違い。Konrad Bernlöhr(1998)の論文 "CORSIKA and SIM TELARRAY"*5より引用。【左】300 GeV の超高エネルギーガン マ線の入射によってつくられる電磁シャワーのシミュレーション計算結果。COsmic Ray SImulations for KAscade(CORSIKA)による。図からわかるように、電磁シャワーは上 空 ~ 10 km あたりでピークとなる。【右】1 TeV の陽子が生成するハドロンシャワー。 プロトンは始めにパイオンを生成する。このパイオンが入射方向に対して、垂直な方向 に運動量を持つ。この効果によってハドロンシャワーは電磁シャワーと比較して横に広 がった分布を取る。

■チェレンコフ放射

図 2.11 の右図で示すように、生成された荷電粒子は相対論的な速度で運動している ($\beta_2 \sim 1$)ため、 $\beta_2 > 1/n$ のときに、青色の光を放射する。これはチェレンコフ光と呼ばれる。ここで

- *c* :光速
- β₂c:荷電粒子の速度
- n:大気中の屈折率



図 2.11 チェレンコフ光の放射概念図。Fruck (2015)より引用。【右】相対論的な速度 で運動している荷電粒子が $\beta_2 > 1/n$ を満たすとき、 $\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta_2}$ で決まる放射角 θ_c の 方向にチェレンコフ光を放射する。大気中での放射角は $\theta_c \sim 1.4^\circ$ 程度となる。【左】速 度が遅く $\beta_2 \leq 1/n$ のときには、チェレンコフ光は放射されない。

である。チェレンコフ光は放射角 θ_c の方向に放射される。放射角は

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta_2} \tag{2.3}$$

で決定される。大気中の屈折率はn = 1.00028なので、放射角は $\theta_c \sim 1.4^{\circ}$ 程度となる。

■ライトプール

図 2.12 の左図は、一つの荷電粒子が大気中でチェレンコフ光を放射する過程の模式図 である。生成された荷電粒子は、エネルギーが高く $\beta_2 > 1/n$ を満たすのでチェレンコフ光 を出す。粒子は下に進むにつれて、エネルギーを失っていくので、 β が小さくなり、放射角 θ_c は広がってゆく。さらにエネルギーを失って $\beta_2 \leq 1/n$ となるとチェレンコフ光は放射 されなくなる (図 2.11 左)。電磁シャワーを構成する大量の荷電粒子がこのようなチェレ ンコフ放射過程を行うと、地表に光子密度の大きい領域ができる (図 2.12 右)。この領域を ライトプールという。

■入射ガンマ線のエネルギーとライトプール内のチェレンコフ光子密度の関係

図 2.13 は、シミュレーションによる、地表でのチェレンコフ光子密度分布である。入射 ガンマ線のエネルギーによらず、ある半径の内側での光子密度が一定なことがわかる。こ の半径をライトプールと定義する。典型的なライトプールの半径は~120mである。ライ



図 2.12 シャワー粒子速度とチェレンコフ放射角の関係。Voelk & Bernloehr (2008)よ り引用。【左】エネルギーの高い荷電粒子は放射角 θ_c も狭いが、だんだんエネルギーを 失っていくと β_2 が小さくなり、放射角 θ_c は広がってゆく。【右】この効果により、地表 にチェレンコフ光子密度の大きい領域ができる。これをライトプールという。典型的な ライトプールの半径は ~ 120 m である。

トプールの大きさは、IACT の有効面積に対応する。

また、入射ガンマ線のエネルギーと光子密度がほぼ比例関係なこともわかる。これは、エ ネルギーが高いほど、チェレンコフ放射をする荷電粒子が大量に生成されるからである。

■放物面鏡を用いたチェレンコフ光の観測

IACT は図 2.14 に示すように、ライトプールに放射された大量の荷電粒子によるチェレンコフ放射光を、放物面鏡で反射させて集光し、焦点距離に設置されたカメラで観測することで、入射された超高エネルギーガンマ線を間接的に測定する。

観測されたチェレンコフ光子数を用いることで、入射ガンマ線のエネルギーを算出する ことができる。また、図 2.14 のように、チェレンコフ光イメージの長軸および短軸のパラ メーターなどを用いることで、到来方向を決定することもできる(cf. Fruck 2015)。

■ハドロンシャワーとの区別

超高エネルギーガンマ線の測定の際に、障害となるのが、宇宙線由来のチェレンコフ光 との区別である。超高エネルギーガンマ線由来のチェレンコフ光イベントの頻度と、宇宙 線由来のチェレンコフ光イベントの比は、1:1000–10000 程度である。したがって、大量 のチェレンコフ光イベントから、ガンマ線由来のイベントを識別する方法が必要である。



D. Sobczynska, CORSIKA simulations

図 2.13 電磁シャワーによる地表でのチェレンコフ光子密度分布のエネルギー依存性。 Olaizola (2015)より引用。CORSIKA によるシミュレーション。各エネルギーごとの ガンマ線が作る電磁シャワーによる地表でのチェレンコフ光子密度分布。ある半径まで は光子密度分布が一定であることがわかる。この半径がライトプールの半径である。ラ イトプールの大きさは、IACT の有効面積に対応する。典型的なライトプールの半径は ~120m である。また入射ガンマ線のエネルギーと光子密度がほぼ比例関係なこともわ かる。

陽子やヘリウムなどの宇宙線は大気中の原子核との相互作用によって、パイオン π⁰, π⁺, π^{-} を生成する。三種の生成はそれぞれほぼ同じ確率で起こる。主な崩壊過程として、 π^{+} , π^- は静止系での平均寿命 $2.6 \times 10^{-8} \,\mathrm{s}$ で

$$\begin{cases} \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \longrightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu \end{cases}$$
(2.4)

に崩壊し、続いて μ^+ , μ^- は静止系での平均寿命 2.2 × 10⁻⁶ s で

$$\begin{cases} \mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \\ \mu^- \longrightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu \end{cases}$$
(2.5)



図 2.14 IACT によるチェレンコフ光観測の概念図。Fruck (2015)より引用。IACT は、 電磁シャワーが作るチェレンコフ放射光を、放物面鏡で反射させ集光し、焦点距離に設置 されたカメラで観測することで、入射された超高エネルギーガンマ線を間接的に測定す る。チェレンコフ光子数を用いて入射ガンマ線のエネルギーを算出できる。チェレンコ フ光のイメージの長軸と短軸のパラメーターを用いて、到来方向を決定できる。またイ メージの違いからハドロンシャワー由来のチェレンコフ放射光と区別することができる。

に崩壊する。一方、 π^0 は、静止系での平均寿命 8.5 × 10⁻¹⁷ s で

$$\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$$
 (2.6)

に崩壊する。

パイオンの崩壊で生成されたガンマ線および電子陽電子も、同じ過程を経てチェレンコ フ光を放射する。宇宙線由来のシャワーを、電磁シャワーと区別してハドロンシャワーと 呼ぶ。パイオンは生成時に、入射方向と垂直な方向に運動量を持つ。シミュレーションに よって生成されたハドロンシャワー例を図 2.10(右)に示す。図からもわかるように、電 磁シャワーと比較すると、ハドロンシャワーは横に広がった分布をしていることがわかる。 したがって、宇宙線由来のチェレンコフ光の像は、ハドロンシャワーが横に広がった分布を とることで、図 2.14 の楕円形の像と比較して、広がりを持った像をとる。この違いから、 ガンマ線由来のチェレンコフ光イベントを識別する。
■現行の IACT (MAGIC, H.E.S.S. & VERITAS)

現行の IACT は MAGIC, H.E.S.S. & VERITAS である。これらの感度曲線を図 3.1 に 示す。現行の IACT は 100 GeV から数十 TeV までの超高エネルギーガンマ線を観測する ことができる。

IACT は人工衛星の望遠鏡と比較して有効面積が非常に大きいため、到来頻度の低い超高 エネルギーガンマ線の測定を行うことができる。

超高エネルギーガンマ線の中でも、数百 TeV といった、よりエネルギーの高いガンマ 線は、さらに到来頻度が低くなる。したがって、これを測定するためには、地上に多くの IACT を広げて設置して、有効面積をさらに大きくすることが効果的である。

一方、先に述べたように、チェレンコフ光量は一次超高エネルギーガンマ線のエネルギー に比例するので、低いエネルギーのガンマ線を検出するためには、少ないチェレンコフ光 を効率よく集める必要がある。したがって、IACTを用いて、数十 GeV といった、よりエ ネルギーの低い超高エネルギーガンマ線の観測を行うためには、IACTの放物面鏡を大きく することが有効である。これにより、チェレンコフ光の集光能力が上がり、夜光に対する チェレンコフ光の比を大きくすることができ、超高エネルギーガンマ線の観測可能なエネ ルギー閾値を下げることができる。

2.3 ガンマ線バースト(Gamma Ray Burst, GRB)

2.1 節で述べたように、超高エネルギー天体は爆発現象や相対論的速度のプラズマ流体 と関連している。一方、似たような特徴から、超高エネルギーガンマ線天体として予言さ れているが、現在まで IACT での観測ができていない天体現象として、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst, GRB) がある。GRB は銀河系外で発生し、瞬間的に大量のガンマ線 を放射する突発現象である。

GRB は、太陽が一生に発する全エネルギー*⁶を上回る ~ 10^{52} erg から ~ 10^{54} erg もの エネルギーを、数十ミリ秒から数百秒の間に放射する突発現象である。また、宇宙の中で最 も明るい*⁷電磁波放射現象である。

GRB は人工衛星に搭載された望遠鏡によって発見された。初めて GRB を捉えたの は、アメリカとソ連間での核実験禁止条約を監視するための、地上核実験探査衛星 VELA である。VELA は、地上ではなく、宇宙からガンマ線が到来している現象を報告した (Klebesadel et al. 1973)。以降、人工衛星に搭載された望遠鏡による観測で、特に MeV エ

 $^{^{*6}\}sim 10^{51}\,\mathrm{erg}_{\circ}$

^{*7「}明るい」という言葉は、ここでは「光度(Luminosity)が大きい」という意味で表現している。単位は erg/s。



図 2.15 GRB 990123 のスペクトル。Briggs et al. (1999)より引用。【上】 微分スペク トル。X 線突発天体と比較すると GRB はハードなスペクトルを持つ。 微分スペクトル の単位は [光子数]/[面積×時間×エネルギー] である。途中で折れ曲がりがあることがわ かる。微分スペクトルはバンド関数 $\phi(E)$ でうまく表現できる (Band et al. 1993)。【下】 上に E^2 をかけたもの (νF_{ν} プロット)。 νF_{ν} プロットの次元は [エネルギー]/[面積×時 間] である。エネルギーフラックスとも呼ばれる。 νF_{ν} は、あるエネルギーの光子が持つ エネルギー密度に相当する。この図で言うと、1 MeV のエネルギーの光子が持つエネル ギー密度が一番高い。この場合ピークエネルギーは $E_{\rm p} \sim 1$ MeV となる。

ネルギー帯に関して、様々なことがわかってきた。

■GRB スペクトル

「ガンマ線」バーストと呼ばれている理由は、スペクトルが他の X 線突発天体と比較したときに、高エネルギー側でのスペクトル減衰の効果が弱く、相対的にガンマ線を多く放

出しているからである*⁸。図 2.15 の上図は GRB 990123 の微分スペクトルである(Briggs et al. 1999)。微分スペクトルという物理量は「単位時間、単位面積、単位エネルギーあた りに検出される光子数」として定義される。図 2.15(上)の点線で示されているように、GRB のスペクトルは、バンド関数 $\phi(E)$

$$\phi(E) = \begin{cases} A\left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha} \exp(-E/E_0) & ((\alpha - \beta)E_0 \ge E) \\ A\left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha)\left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\beta} & ((\alpha - \beta)E_0 \le E) \end{cases}$$
(2.7)

の経験式でよく表現できることが、知られている (Band et al. 1993)。ここで、E は到来する光子のエネルギー、 E_0 はべきの折れ曲がりを決定するパラメーター、A は規格化定数である。 α および β はそれぞれ低エネルギー側、高エネルギー側のスペクトルのべきを決めるパラメーターである。 $\phi(E)$ は E^{α} と E^{β} を、 E_0 付近で滑らかに接続する。

図 2.15 の下図は、上図で示した微分スペクトルに E^2 をかけたものである。この次元量、 つまり [エネルギー]/[面積 × 時間] は、この論文中で頻出する量である。図 2.15(下) のよ うなプロットは、 νF_{ν} プロット、Spectral Energy Density(SED) またはエネルギーフラッ クスと呼ばれることもある。 νF_{ν} は、あるエネルギーの光子が持つエネルギー密度に相当 する*⁹。 νF_{ν} と同じ次元の量の図が、図 2.16 左奥の紫色の曲線で示されている。この曲線 は GRB 観測衛星 BATSE による GRB 光度曲線の例である (Shahmoradi 2013b)。図 2.15 (下) や図 2.16 が示すように、 $E^2 \times [$ 微分スペクトル] は、 $E^2 \times \phi(E)$ で表現され、 $E = E_p$ でピークを持つ。 E_p はピークエネルギーと呼ばれ、最も放射の強いエネルギー帯域を示 している。Yonetoku et al. (2004) は図 2.17 に示すように、 E_p が大きな GRB は最大光度 L_p*^{10} も明るい、という米徳関係を示した。米徳関係は E_p と L_p がおおよそ

$$L_{\rm p} \propto E_{\rm p}^2$$
 (2.8)

の関係に従うことを示す。

■GRB 即時放射と残光放射

GRB による瞬間的な大量のガンマ線放射は、即時放射(Prompt Emission)と呼ばれて いる。一方、即時放射が終了したあとにも、時間のべき関数に従いながら、長期間にわたり 減光していく様子が観測される。例えば、GRB 970228 が発生した方角から、X 線(Costa et al. 1997)*¹¹や、可視光(van Paradijs et al. 1997)*¹²が観測された。このように、GRB 発

^{*&}lt;sup>8</sup> ハードなスペクトルと表現する。

^{*&}lt;sup>9</sup> νF_ν は、対数で表現されたエネルギー帯域あたりに放射されるエネルギー量にも対応する。あるエネルギー 領域を対数で積分すると、そのエネルギー領域の光子が持つエネルギーが求まる。

 $^{*^{10}}$ 単位は erg/s_{\circ}

^{*11} BeppoSAX 望遠鏡

^{*12} William Herschel 望遠鏡



図 2.16 BATSE による GRB 光度曲線の測定データ例。Shahmoradi (2013b)より引 用。GRB のトリガー "BATSE GRB trigger 1085" が検出されてからの光度曲線を異な るエネルギーバンドで表現している。異なるエネルギーバンドは BATSE が持つ、四つ のエネルギーチャンネルに相当する。図中のピークエネルギー Ep は、最も放射強度が 高いエネルギー帯域を示す。即時放射持続時間 T90 は GRB 総フルーエンスの 5% が検 出された時刻から95%が検出された時刻までの時間で定義される。

生後、数時間から数週間にわたって、電波からエネルギーの低いガンマ線にわたり観測され る放射を、即時放射と区別して残光放射(Afterglow)と呼ぶ。特に可視光成分の追観測に よって、GRB 対応天体の位置を正確に決められるようになっただけでなく、母銀河の場所 がわかるようになり、分光で赤方偏移 z を求められるようになった。実際に Metzger et al. (1997)は GRB 090508 の赤方偏移が z = 0.835 であることを決定し、GRB が宇宙論的距 離で発生している*13現象だということを初めて突き止めた。

■Long GRB と Short GRB

GRB は即時放射の特徴で

• Long GRB

^{*13} つまり銀河系外で発生している。



図 2.17 ピークエネルギー E_p と最大光度 L_p の関係。Yonetoku et al. (2004)論文の 更新版の図を http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/GRBCosmology/ ep-1.htm より引用。 E_p は最も放射強度が高いエネルギー帯域である。 E_p と L_p がお およそ $L_p \propto E_p^2$ に従うこの関係は米徳関係と呼ばれる。ほぼ全ての GRB に共通して成 り立つ性質だが、どうしてこのような関係が成り立つかの物理的根拠は明確になってい ない。

Short GRB

の二つの種族に分類される。図 2.16 は先にも述べたように、GRB 観測衛星 BATSE の、 GRB 光度曲線例を示している。右奥の灰色の曲線は、すべてのエネルギー帯にわたる光 度曲線を示している。図中の T_{90} は、即時放射の持続時間に相当する量である。 T_{90} は、 GRB 総フルーエンス*¹⁴の 5% が検出された時刻から 95% が検出された時刻までの時間

^{*&}lt;sup>14</sup> フラックスを積分した物理量。単位は erg/cm²。



図 2.18 Long GRB, Short GRB の持続時間およびピークエネルギーの違い。Shahmoradi & Nemiroff (2015)より引用。【左下】Shahmoradi (2013a)でグループ分けされた Long GRB, Short GRB の持続時間 T_{90} およびピークエネルギー E_P の散布図。 T_{90} と E_P の定義は、図 2.16 参照。全体の7割が Long GRB で3割が Short GRB である。 【左上】持続時間 T_{90} のヒストグラム。【右下】ピークエネルギー E_P のヒストグラム。

で定義される。図 2.18 の左下図は、BATSE が検出した GRB2130 例の T_{90} および E_p プ ロット図である (Shahmoradi & Nemiroff 2015)。図 2.18 の左上図は T_{90} のヒストグラム である。 T_{90} 、つまり即時放射の持続時間についての特徴で、持続時間の長い Long GRB と 短い Short GRB に分けられる。

■ジェットの存在

図 2.19 は GRB の放射概念図である。図に示すように、GRB は Long GRB、Short GRB どちらの種族においても、放射は等方に放たれているのではなく、むしろ狭い立体角に絞られていると考えられている。狭い立体角に絞られた流体のことを、コリメートされた流体という。コリメートされた、相対論的速度で動くプラズマ流体の流れをジェットと呼ぶ。 Harrison et al. (1999)はどちらの種の GRB も、ジェットによって引き起こされているということを提唱した。図 2.20 は、GRB 990510 の残光放射の光度曲線である。図を見ると、バーストから 1.2 日経過したところで、様々な周波数の光度曲線が一斉に折れ曲がってい



図 2.19 ガンマ線バーストの放射概念図。http://www.outerspacecentral.com/ gamma_ray_page.html の図を改変。ガンマ線バーストは即時放射 (Prompt Emission) で瞬間的に大量のガンマ線を放射した後、残光放射 (Afterglow) で、電波からエネル ギーの低いガンマ線を放射する (e.g. Costa et al. 1997; van Paradijs et al. 1997)。残光 放射は時間のべき関数で徐々に減光する。残光放射の観測によって GRB の距離と位置 を正確に求められる (Metzger et al. 1997)。GRB は等方放射現象ではなく、狭い立体角 に絞られた放射だと考えられている。ジェットが内部衝撃波および外部衝撃波を形成し、 それぞれ即時放射と残光放射を引き起こす (e.g. Piran 1999)。GRB は Long GRB およ び Short GRB の二種に分けられる (e.g. Shahmoradi 2013a)。Long GRB は大質量星の 崩壊によって引き起こされる現象だと考えられている (Hjorth et al. 2003)。Short GRB は中性子星連星の合体が引き金になっていると言われている (e.g. Abbott et al. 2017)。

ることがわかる。Harrison et al. (1999)は、この折れ曲がった時間は、ジェットのコリメートが解除されて、ビーミングの効果も弱まった時間だと対応付けた。また、折れ曲がった時間によって、ジェットの絞られている角度 θ₀ を

$$\theta_0 = 0.08 \left(\frac{n}{1 \,\mathrm{cm}^{-3}}\right)^{1/8} \,\mathrm{rad}$$
(2.9)

と算出できることも示した。

■激しい光度時間変動と GRB ジェット流出速度の下限値

ジェットがどの程度の速度で放出されているかは、まだ詳細にはわかっていない。しか し、ジェットの運動速度の下限値を決定する手法は、Lithwick & Sari (2001)によって確 立されている。下限値は、GRB 光度の時間変動の激しさなどによって決定される。



図 2.20 可視光残光放射の光度曲線。Harrison et al. (1999)を引用。GRB 990510 の可 視光の残光放射が 1.2 日したところで、V バンド、R バンド、I バンド、どの周波数の光 度曲線も折れ曲がっていることがわかる。これによって GRB が等方に放射されている のではなく、コリメートされているということがわかった。観測によってジェットの絞 られている角度 θ₀ が決まる。

GRB の即時放射は激しく時間変動することが、BATSE の観測からわかっている。また、 各 GRB ごとに光度曲線が多種多様なことも知られている*¹⁵。最も短いものでは変動時間 $\delta t \sim 10$ msec で激しく変動する。

Ruderman (1975)は、コンパクトネス問題と呼ばれる問題を提唱した。コンパクトネス 問題とは、「もし GRB によるジェットの速度が非相対論的速度だと仮定すると、ガンマ線

^{*&}lt;sup>15</sup> 光度曲線の変動の様子は図 2.22(b) 参照。

が観測されなくなる」という問題である。具体的には、エネルギーの高いガンマ線が、多く の電子陽電子を対生成し、その結果、放射領域が光学的に厚くなり、ガンマ線が外に放出さ れないという問題である。コンパクトネス問題を式で表現すると、非相対論流体の光学的 厚み *⁺* は、

$$\hat{\tau} = (2.1 \times 10^{11}) \left[\frac{(d/7 \,\mathrm{Gpc})^2 (0.511)^{-\beta+1} f_{1\mathrm{MeV}}}{(\delta t/0.1 \,\mathrm{s})(\beta-1)} \right]$$
(2.10)

となる。ここで

- *d*: GRB までの距離
- *δt*:時間変動

である。また、微分スペクトル*¹⁶は $fe^{-\beta}$ で与えられるとしている。ここで β は微分スペクトルのべき*¹⁷で、f は規格化定数である。ここでは、規格化定数を、

• f_{1MeV} : 1MeV での微分フラックス(単位 MeV⁻¹s⁻¹cm⁻²)

としている。式は、典型的な GRB の距離、時間変動、スペクトルのべき ($\beta \sim 2$)、フラッ クスでは光学的厚みが $\hat{\tau} \sim 10^{11}$ ($\gg 1$) となり、Optically thick($\tau > 1$) でガンマ線が見え ないことを示している。しかし、この結果は、実際にはガンマ線が観測されているという事 実と矛盾する。

Lithwick & Sari (2001) は観測者の視線方向に、ジェットが相対論的な速度で放出さ れていれば、コンパクトネス問題が解決できることを示した。相対論的速度のジェットが Lorentz factor Γ で流れていると、

- 観測者から見て Γ で動いている光子のエネルギーは、共動系でのエネルギーの Γ 倍
 になるという青方偏移の効果
- ・実際の放射領域の大きさは、観測者が観測する実際の時間変動 δt によって見積もられる大きさ $c\delta t$ の Γ^2 倍になる効果(Piran 1999)

によって光学的厚みが

$$\tau = \hat{\tau} \left(\frac{e_{\max}}{0.511 \,\mathrm{MeV}}\right)^{\beta-1} \Gamma^{-2\beta-2} \tag{2.11}$$

$$\propto \hat{\tau} \Gamma^{-6} \tag{2.12}$$

となる。ここで、

• e_{max}:観測された最大のエネルギー

^{*&}lt;sup>16</sup> つまり [光子数]/[面積 × 時間 × エネルギー]。 *¹⁷ φ(E) の β に相当。

表 2.1 ジェット速度 Γ の下限値。Lithwick & Sari (2001)のパラメーター記法を一 部改変。パラメーターは本文中の定義と同様。ジェットの下限値は、式 (2.15) より、 $\Gamma_{\min} \propto [d^2 f_{1MeV} e_{\max}/\delta t]^{1/6}$ である。 $d, \beta, f_{1MeV}, \delta t, e_{\max}$ らの詳細な観測によって、 ジェットの下限値をより厳しく決定できる。

GRB	f_1	β	$e_{\rm max}/m_ec^2$	Z	$\hat{ au}$	Limit
910503	8.71	2.2	333	1	3.0×10^{12}	340
910601	0.5	2.8	9.8	1	1.8×10^{11}	72
910814	13.5	2.8	117	1	4.7×10^{12}	200
930131	1.95	2.0	1957	1	7.0×10^{11}	420
94021 7	0.36	2.5	6614	1	1.2×10^{11}	340
950425	1.62	1.93	235	1	6.0×10^{11}	300
990123	1.1	2.71	37	1.6	1.2×10^{12}	150

である。また β~2 としている。

ここで、 $(e_{\text{max}}/0.511 \text{ MeV}) \sim 100$ と、式 (2.10) および式 (2.12) より、ガンマ線が放出 されるための条件、すなわち Optically thin

$$\tau < 1 \tag{2.13}$$

となる条件は、

$$\Gamma > 100 \tag{2.14}$$

程度である。実際の計算結果を表 2.1 にまとめる。

また、 $\beta \sim 2$ 、式 (2.10)、式 (2.11) より、Optically thin となり始める条件 $\tau \sim 1$ によって決まる下限速度 Γ_{\min} は、

$$\Gamma_{\rm min} \propto (d^2 f_{\rm 1MeV})^{1/6} \left[\frac{e_{\rm max}}{\delta t}\right]^{1/6}$$
(2.15)

である。

表 2.1 でも示されているように、GRB の距離 d、微分スペクトルのべき β 、規格化定数 f_{1MeV} 、時間変動 δt および最大エネルギー e_{max} を詳細に観測することで、下限値を正確に 決められることを意味している。

■火の玉モデルと GRB ジェット流出速度の上限値

このようにジェットが相対論的な速度で放出されていることはわかっているが、実際に 何によってジェットが加速されているかはわかっていない。ジェットの加速モデルとして、 火の玉モデルがある(Shemi & Piran 1990)。火の玉モデルはジェットを Γ > 100 に加速さ せるモデルとして有名である。

火の玉モデルは、莫大なエネルギー Eを持つ、小さな半径 R_0 の熱的な火の玉を初期 状態に仮定する。 R_0 は、GRBの変動時間 $\delta t \sim 10$ msec より小さいとして、ここでは

33

 $R_0 \sim 10^5 \,\mathrm{m} \,(< c \delta t)$ と決める。火の玉は自分の熱圧力で加速膨張する。断熱自由膨張なので、

- 共動系のエントロピー: T^3R^3
- 観測者系のエネルギー: $\Gamma T^4 R^3$

が保存される。これより、火の玉は半径が大きくなると、

$$\Gamma \propto R$$
 (2.16)

で加速する。

流体は火の玉が持っていたエネルギー E が流体のエネルギー $\Gamma M c^2$ と同じになる程度まで加速する。つまり、

$$\Gamma \sim E/Mc^2 \tag{2.17}$$

まで加速する。ここで議論の都合上、変数 η を

$$\eta := E/Mc^2 \tag{2.18}$$

と定義する。すると、加速前の速度は $\Gamma \simeq 1$ 、加速後の速度は $\Gamma \sim \eta$ と表現できる。した がって、加速が終わったときの半径 R_a は、式 (2.16) より $R_a/R_0 = \eta/1$ なので

$$R_a = \eta R_0 \sim 10^7 \left(\frac{R_0}{10^5 \,\mathrm{m}}\right) \left(\frac{\eta}{100}\right) \,\mathrm{m}$$
 (2.19)

である。

一方、火の玉が膨張すると密度は減少して、火の玉は optically thin になっていく。Ioka (2007)より、火の玉が透明になる ($\tau < 1$) ときの半径 R_p は

$$R_p \sim 10^{10} \left(\frac{E}{10^{42} \,\mathrm{J}}\right)^{1/2} \left(\frac{\eta}{100}\right)^{-1/2} \,\mathrm{m}$$
 (2.20)

である。

図 2.21 の長い点線は、火の玉モデルで計算された、ジェットの Lorentz factor Γ を示している (Shemi & Piran 1990)。

ここで、加速が終わるまでの間、火の玉が Optically thick である場合は、加速終了の半 径 R_a が、火の玉が透明になり始める半径 R_p より小さい状況、つまり

$$R_a < R_p \stackrel{\text{Eq.}(2.19)\&\text{Eq.}(2.20)}{\longleftrightarrow} \eta < 10^4$$
(2.21)

に対応している。この状況の場合、図 2.21 で長い点線 (Γ) が右上がりになっていることが わかる。これは、流体が $\Gamma \sim \eta$ まで加速されることを示している。



図 2.21 火の玉モデルによるジェット加速の効果。Shemi & Piran (1990) より引用。 【長い点線】観測者が観測するジェット速度 $\Gamma_o \eta$ が小さいと Γ は右上がりになる。これ は火の玉が Optically thin になる前に加速が完了し、ジェットは $\Gamma \sim \eta$ の速度を持つこ とができる。一方、 η が小さいと Γ は右上がりになる。これはバリオンの質量が少なす ぎるために、加速が完了する前に、火の玉が Optically thin になり、熱的に放射された光 子がジェットの加速に流体の加速に使われるはずであったエネルギーを持ち去ってしま う効果を表している。Shemi & Piran (1990)の計算では、 $R_0 \sim 10^6$ cm, $E \sim 10^{50}$ erg としていることに注意。【実線】光球面の温度。 m_ec^2/k_B で無次元に規格化している。 【短い点線】始めに火の玉が持っていたエネルギー E に対する、放射される全エネルギー の比。

他方、加速が終わるまでに、火の玉が Optically thin になってしまう条件、つまり

$$R_a > R_p \xrightarrow{\text{Eq.}(2.19)\&\text{Eq.}(2.20)} \eta > 10^4$$
(2.22)

の時は、図 2.21 で、長い点線 (Γ) が右下がりになっていることがわかる。これは、加速の途中で火の玉が透明になってしまい、流体が $\Gamma \sim \eta$ まで加速されないことを示している。 $\eta \propto M^{-1}$ は流体を形成する陽子などのバリオンの質量 *M* に対応する。したがってこの状 況は、バリオンが少なすぎて、加速される前に密度が薄くなり、火の玉が透明になってしま うことを意味する。このとき光子は熱的に放射されてしまい、流体の加速に使われるはず であったエネルギーを持ち去ってしまう。

実際の放射は熱的放射のスペクトルに従っていないことが、観測からわかっているので、 $\eta > 10^4$ の領域は現実と矛盾する。

よって、この結果から GRB ジェットの上限速度 Γ を求めることができる。式 (2.17) と $n < 10^4$ より、ジェットの上限速度は

$$\Gamma < 10^4 \tag{2.23}$$

である。

この結果と先に述べた下限 $\Gamma > 10^2$ を組み合わせると、GRB は光速の 99.99%-99.99999%の速度を持つ爆発現象であるということが言える。

■衝撃波からの放射機構

続いて、ジェットの運動エネルギーがどのように放射に変換されるかを述べる。現在有 力なモデルは、図 2.19 が示すように、

- 即時放射:内部衝撃波モデル
- 残光放射:外部衝撃波モデル

である(e.g. Piran 1999)。

中心の駆動天体が、持続時間 T の間、間隔 $\delta t (\ll T)$ で、 Γ の異なる流体を、同方向に放 出すると、流体同士が衝突して内部衝撃波を形成する。このとき、流体の運動エネルギー がジェットの内部エネルギーに変換される。何らかの物理機構によって内部エネルギーが ガンマ線として放射される。しかしどのように内部エネルギーが放射に変換されるのかは、 まだ詳細が分かっていない。Ioka (2007)によると、内部衝撃波が形成される典型的な半径 を用いて計算すると、時間変動 δt で、T の間、即時放射が観測される。したがって、内部 衝撃波モデルを用いて、即時放射の急激な光度変動を再現することができる。

ぶつかった流体同士は大きな一つのジェットとなり、周りの星間物質をある程度押しのけると、続いて外部衝撃波を生成する。外部衝撃波によって運動エネルギーが内部エネルギー に変換される。外部衝撃波はシンクロトロン放射によって電磁波を放射する(Inoue et al. 2013a)。こちらが、残光放射の外部衝撃波モデルである。

■Long GRB および Short GRB を引き起こす天体候補

図 2.18 で示したように、Long GRB と Short GRB は、持続時間などの特徴に差がある ため、GRB を引き起こす天体が異なると考えられている。

Long GRB は残光放射の可視光測定による結果から、Ic 型超新星爆発と同期しているこ



図 2.22 Fermi 望遠鏡による GRB の観測例。(a)Long GRB(GRB 080916)の例。Abdo et al. (2009)の着色したものを https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/ grbs/より引用。Fermi には GBM と LAT の二種類の望遠鏡が搭載されている。GBM のエネルギー範囲は数 keV-数十 MeV、LAT のエネルギー範囲は数十 MeV-数百 GeV である。(b)Short GRB(GRB 090510)の例。Abdo et al. (2009)より引用。GRB の特徴 である、非常に時間の短い光度変動が確認できる。

とがわかっている(Hjorth et al. 2003)。そのため、Long GRB は図 2.19 に示すように、大 質量星の重力崩壊によって引き起こされる現象だと考えられている。

一方、Short GRB は中性子星連星の合体が引き金になっていると言われている。特に Short GRB に関しては、Abbott et al. (2017)が、GW170817 の中性子星連星の合体による 重力波と同時に、実際に Short GRB が検出されたことを報告した。

2.4 IACT によるガンマ線バースト観測の必要性および課題

2.3 節で述べたように、GRB の振る舞いは、人工衛星に搭載された望遠鏡や重力波望遠 鏡*¹⁸による、即時放射の観測、および電波からエネルギーの低いガンマ線までの広範囲に 渡る残光放射の観測によって、ある程度までわかってきた。

しかし、現状では不明な点も多く、例えば、

- 中心駆動天体による、ジェットの生成および加速機構
- ジェットによる粒子加速の物理機構

36

^{*&}lt;sup>18</sup> 最近はニュートリノ望遠鏡も組み合わされる。このようにあらゆる種類の望遠鏡を用いて観測をすること を、マルチメッセンジャー観測という。

内部エネルギーからガンマ線即時放射への転換の機構

は詳細にはわかっていない。

特に、即時放射に関しては、残光放射に比べて、より中心駆動天体に近いところで起きて いると考えられるので、即時放射の天体物理学を理解できれば、ジェットによる生成機構を 理解出来るだけでなく、大質量星や中性子星連星による、ブラックホール生成のメカニズム に迫ることができる。

また最近は、Fermi 望遠鏡によって GRB の MeV 領域だけではなく、GeV 領域の一部の 振る舞いもわかってきた。Fermi 望遠鏡は IACT の少し下のエネルギー領域を観測できる、 人工衛星搭載型のガンマ線望遠鏡である。

Fermi 望遠鏡での Long GRB と Short GRB の光度曲線の例を図 2.22 に示す。これまでの Fermi による GRB の GeV 放射についての観測から、

- GeV ガンマ線放射は、Long GRB でも Short GRB でも起こっていること
- MeV スペクトルの延長上に GeV スペクトルが存在すること
- GRB によっては 100 GeV あたりまでスペクトルが延びていること
- スペクトルの GeV 領域に、バンド関数では説明できない超過成分を持つ GRB も存 在すること

がわかってきた(Inoue et al. 2013a)。

このように、GRB スペクトルが GeV 領域まで延びていることがわかったため、GRB に よって超高エネルギーガンマ線が放出されている可能性が期待される。どのエネルギー領 域までスペクトルが延びているか、またそれがどのような時間変動を持っているのかがわ かると、ジェットの運動速度の下限値を制限できる。具体的には、より細かな時間変動 *δt* および、より大きな観測最大エネルギー *e*max がわかると、式 (2.15) により、

$$\Gamma_{\min} \propto \left[\frac{e_{\max}}{\delta t}\right]^{1/6}$$
 (2.24)

となり、ジェットの下限値を、より厳しく決定することができる。

このために、超高エネルギーガンマ線を観測することは必要不可欠だが、現状の望遠鏡で は、GeV 領域の GRB 放射を詳細に観測することができない。具体的な課題を三点以下に 示す。

■【課題 1】有効面積が小さいことによる GRB 観測制限(人工衛星搭載型望遠鏡)

現在 GRB の放射について、最も高いエネルギーを精度よく観測できている望遠鏡は Fermi 望遠鏡である。しかし現状、Fermi 望遠鏡を用いても 100 GeV 以上の GRB による 放射は観測することが大変難しい。この理由は、2.2 節で説明したように、人工衛星では有 効面積が小さく、したがって、観測されるガンマ線の統計量を増やすことが難しいからで



図 2.23 GRB 到来方向分布。到来方向分布を銀河座標で表示している。(a) コンプトン 衛星に搭載された BATSE による GRB2704 例。https://gammaray.nsstc.nasa. gov/batse/grb/skymap/ より引用。一様等方に分布していることを初めて示した。 (b)Fermi による GRB1405 例。https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/ grbs/ より引用。Fermi は今も稼働している、最先端の衛星搭載型望遠鏡である。IACT は Fermi らの GRB アラートを受けて、高速ポインティングを行う。

ある。

■【課題 2】エネルギー閾値が高いことによる GRB 未観測(既存の IACT)

一方、人工衛星の少し上のエネルギー領域を観測する望遠鏡が IACT であるが、現行の 三つの IACT では GRB が検出できていない。図 3.1 に示されている MAGIC、H.E.S.S.、 VERITAS の感度曲線を見ると、100 GeV を下回った領域の感度が急激に悪くなることが わかる。これは、100 GeV より低いエネルギーのガンマ線は、十分なチェレンコフ光を出 すことができず、夜光に埋もれて検出できなくなってしまうからである。

また、GRB は銀河系外から到来するガンマ線であるが、100 GeV を超えたエネルギーの ガンマ線は、宇宙空間を伝搬する間に、宇宙背景光と電子陽電子対生成を起こして減光して しまう(Finke et al. 2010)(図 3.6)。このこともエネルギー閾値が 100 GeV 程度である現 行の IACT が、GRB を検出できていない理由と考えられる。GRB を観測する確率を飛躍 的に高めるためには、エネルギー閾値を 100 GeV よりも下げることが重要である。

■【課題 3】GRB 即時放射測定のための高速回転ポインティング機能(既存の IACT)

図 2.23 は、BATSE および Fermi による GRB の到来方向を示している。GRB は一様 等方に分布していることが図からわかる。

また、GRB の即時放射は図 2.18 の左上図が示したように非常に短い。一方で、IACT は 放物面鏡を用いた集光観測という、その測定原理によって視野が数度に限られてしまう。

これらの事実も観測を難しくしている。視野が狭いため、ランダムな方向に向けた望遠 鏡が、一様等方に到来する GRB を偶然捉えることは、稀である。したがって観測のために

38

は、人工衛星に搭載された望遠鏡からの GRB アラートを受けてからのフォローアップ観測 が基本になる。

GRB と関係のない通常時の観測は、星の移動速度に合わせたポインティング速度で十分 である。しかし、GRB が発生した際には、GRB アラートを受けた後に、高速で望遠鏡を ポインティングするための、特別なシステムを開発する必要がある。

第3章

【装置概要】 Cherenkov Telescope Array と 大口径望遠鏡

この章では、Cherenkov Telescope Array と呼ばれる、解像型大気チェレンコフ望遠鏡を 用いた、次世代の超高エネルギーガンマ線天文台について説明する。また、そこで設置され る望遠鏡の一種である大口径望遠鏡が、第2章で述べた、ガンマ線バースト即時放射を詳 細に測定するための課題を解決できることを述べる。

3.1 Cherenkov Telescope Array (CTA)

Cherenkov Telescope Array (CTA) は、北サイト、南サイトに合わせて 100 台を超える IACT を設置して、全天の観測を行う、次世代の超高エネルギーガンマ線天文台である。既 存の IACT よりも

- 一桁以上高い感度
- 一桁以上広いエネルギー範囲
- 広い視野
- ・ 詳細な角度分解能

を持つ。

図 3.1 は CTA の感度曲線である。感度曲線が示すように、CTA は 20 GeV から 300 TeV にわたるエネルギー範囲の超高エネルギーガンマ線を、既存の望遠鏡の一桁以上高い感度 で観測できる。このように既存の IACT と比較して、広いエネルギー範囲の測定ができる のは、



図 3.1 エネルギー領域ごとの各望遠鏡の感度。https://www.cta-observatory. org/science/cta-performance/#1472563157332-1ef9e83d-426c より引用。 例えば "CTA South 50h" は 50 時間天体を観測した時に 5 σ の検出を得るために、 CTA (南サイト) が必要とする最低のエネルギーフラックスを意味する。Fermi 望遠鏡 は、10 年間測定したとしても 100 GeV の感度は IACT に劣る。これは有効面積が小さ いため、ガンマ線の統計量を増やすことが難しいからである。現行の三つの IACT はエ ネルギー閾値が 100 GeV 程度である。エネルギー閾値を下回ったガンマ線からの信号は 検出ができない。次世代の CTA では既存の IACT と比べて、一桁以上高い感度と、一桁 以上広いエネルギー範囲を達成することができる。

- 大口径望遠鏡(Large Size Telescope, LST)
- 中口径望遠鏡(Medium Size Telescope, MST)
- 小口径望遠鏡(Small Size Telescope, SST)

という口径の異なる三種類の望遠鏡を数多く、広げて配置しているからである(図 3.2、 図 3.3)。これは CTA の一つの重要な特徴である。

LST は放物面鏡が大きいため、2.2 節で述べたように、チェレンコフ光の少ない、より低 いエネルギー領域のガンマ線を観測できる。一方、SST は数を多く設置することによって、 有効面積を増やし、到来頻度の少ない、より高いエネルギー領域のガンマ線に特化させてい る。MST は中間のエネルギー領域を担当する。現在、ラ・パルマ島にある北サイトで LST 一号機の建設が進んでいる。LST, MST, SST それぞれの詳細は、表 3.1 を参照されたい。



図 3.2 LST, MST, SST の配置図。https://www.cta-observatory.org/ science/cta-performance/より引用。LST は口径 23 m の巨大な望遠鏡で、低 エネルギー帯を担当する。それを取り囲むように MST が設置され、エネルギー領域を 担当する。さらに南サイトでは、SST をその周りに大量に設置してより高いエネルギー 領域のガンマ線測定を目指す。

(a)



(b)



図 3.3 CTA の完成予想図。https://www.cta-observatory.org/about/ how-cta-works/より引用。(a) 北サイト (スペイン領、ラ・パルマ島)。(b) 南サ イト (チリ、パラナル)。中心にある4機の大きな IACT が LST、その周りに中型サイ ズの MST、小型サイズの SST が並ぶ。

	大口径望遠鏡	小口径望遠鏡 Small Size					
	Large Size						
	Telescope	Telescope			Telescope		
	(LST)	(MST)			(SST)		
		FlashCam	NectarCAM	SCT	GCT	ASTRI	1M-SST
エネルギー範囲	20 GeV-3 TeV	80 GeV–50 TeV			1–300 TeV		
台数(北半球)	4	15			0		
台数(南半球)	4	25			70		
鏡直径	23.0 m	11.5 m		9.7 m	4.0 m	4.3 m	4.0 m
鏡面積	370 m^2	88 m^2		41 m^2	8.9 m^2	8 m^2	$7,5 \text{ m}^2$
焦点距離	28 m	16 m		5.6 m	2.28 m	2.15 m	5.6 m
総重量	122 ton	82 ton		80 ton	11 ton	19 ton	8.6 ton
視野	4.3°	7.5°	7.7°	7.6°	8.3°	10.5°	8.8°
ポインティング精度	<14 arcsec	<7 arcsec		<1 arcsec	<7 arcsec		
画素サイズ	0.1°	0.17°		0.067°	0.17°	0.19°	0.24°
画素数	1,855	1,764	1,855	11,328	2,048	2,368	1,296

表 3.1 CTA に配置される LST、MST、SST の性能



図 3.4 大口径望遠鏡の図。Acharya et al. (2017)より引用。(a)LST 正面図。(b) 横から 見た図。(c)45° 斜め横から見た図。

3.2 大口径望遠鏡(Large Size Telescope, LST)

CTA に搭載される三種類の望遠鏡の中で、低エネルギー領域に特化している大口径望遠 鏡 (Large Size Telescope, LST)*¹は、特にガンマ線バーストを詳細に測定するための IACT である (図 3.4)。LST を用いれば、2.4 節で述べた三つの課題を解決することができる。

■【解決:課題1】有効面積が小さいことによる GRB 観測制限(人工衛星搭載型望遠鏡) LST は GRB のような、瞬間的な放射によって短時間測定しかできない現象に対して非



図 3.5 短時間測定における、CTA および Fermi 望遠鏡の感度比較。https://www.cta-observatory.org/science/cta-performance/ #1525680063092-06388df6-d2af より引用。ある時間測定した時のそれぞれ の望遠鏡の感度を示している。低エネルギー領域での CTA の感度は、LST が決定す る。GRB の即時放射は長くても~ 100s 程度である(図 2.18 左上)。LST の GRB (10s-100s) に対する感度は、Fermi よりも 10⁴-10⁵ 倍良い。

常に高い感度を発揮する。

人工衛星に搭載された望遠鏡は、昼の影響や天気の影響を受けないので、長時間観測で高 感度を達成できるが、GRB のような瞬間的な現象は長時間測定をすることができない。し たがって、この時の感度は主に有効面積によって決まる。

人工衛星の有効面積は、衛星のサイズに制限される一方、LST の有効面積は、ライトプー ルの大きさによって決まる*²。図 3.5 が示しているのは、短時間の測定に関しての Fermi 望遠鏡と CTA の感度差である。低エネルギー側領域なので、CTA の感度は LST の感度に 相当する。ここからわかるように、GRB のような突発現象に対して、LST は Fermi 望遠 鏡より 10^4 – 10^5 倍感度が高い。したがって、GRB 観測における>20 GeV 光子統計数も、 10^4 – 10^5 倍に増やすことができる。

統計数を増やすことができ、より細かな時間変動 δt がわかると、式 (2.24) より、GRB ジェットの Lorentz factor の下限値 $\Gamma_{\min} \propto [1/\delta t]^{1/6}$ をより厳しく決定できる。

*2 図 2.13 参照。



図 3.6 LST のエネルギー領域における GRB エネルギーフラックスのシミュレー ション。Inoue et al. (2013a)より引用。【黒い実線】Fermi–LAT によって観測された GRB 080916C のスペクトル dN/dE = $1.4 \times 10^{-7} (E/\text{TeV})^{-1.85} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{TeV}^{-1} を$ 、 高エネルギーエネルギー側に外挿したもの。【点】地球にやってくる GRB のエネルギー フラックス。赤方偏移 z = 4.3 の距離にある GRB 080916C からのガンマ線は宇宙背景 光との電子陽電子対生成によって減光する。したがってエネルギーフラックスは黒い実 線よりも下がる。赤、青、緑色の違いは、Finke et al. (2010)や Inoue et al. (2013b)に よる宇宙背景光モデルの違いである (cf. Inoue et al. 2013a)。ここから、100 GeV を超 える GRB は減光の効果が大きいことがわかる。CTA–LST はエネルギー閾値を減光効 果の少ない 20 GeV まで低くできるので、GRB を観測することができる。

■【解決:課題 2】エネルギー閾値が高いことによる GRB 未観測(既存の IACT) 図 3.6 の点は、Fermi 望遠鏡で測定された、ある GRB (GRB 080916C)のスペクトル

$$dN/dE = 1.4 \times 10^{-7} (E/TeV)^{-1.85} cm^{-2} s^{-1} TeV^{-1}$$
 (3.1)

を高エネルギー側に外挿し、宇宙背景光によって減光する効果を合わせることで算出された、数十 GeV 領域で予期される、地球に到来する GRB のエネルギーフラックスである。 この図から、2.4 節で説明したように、100 GeV を超える GRB は減光の効果が大きいこと がわかる。しかしながら、CTA は LST を用いることで、エネルギー閾値を既存の IACT では達成できなかった 20 GeV まで下げることができる。したがって、LST を用いて GRB を短時間で視野内に入れることができれば、GRB シグナルを観測することができる。

IACT での GRB 観測に成功し、より大きな観測最大エネルギー e_{max} がわかると、式 (2.24) より、 $\Gamma_{\min} \propto [e_{\max}]^{1/6}$ をより厳しく決定することができる。

■【解決:課題3】GRB 即時放射測定のための高速回転ポインティング機能(既存の IACT)

LST は GRB を即時放射中に視野へ入れるために GRB アラートを受けてから、高速で LST を回し、ポインティングを行う。高速回転のポインティングは、この論文で述べる研 究により解決される。詳細な説明は第4章で行う。

第4章

【装置詳細】

大口径望遠鏡高速回転電源システム

第2章では数十 GeV 以上のガンマ線バースト即時放射を、既存の望遠鏡で詳細に測定するには三つの課題があることを説明した。第3章では CTA 大口径望遠鏡を用いればそのうちの二つの課題*¹が解決されることを示した。

この章では、残り一つの課題を解決するために開発研究した CTA 大口径望遠鏡高速回転 電源システムについて説明する。この電源システムは、世界で初めて望遠鏡システムにフ ライホイールを搭載している。

4.1 高速回転のための電源システムの必要性

■大電力供給システムの必要性

2.4 節でまとめたように、GRB 即時放射の大半は ~ 100 秒以内に終わってしまう*²た め、LST を高速回転して GRB 天体に素早くポインティングする必要がある。この際数百 kW もの大電力が必要になる*³。しかし、標高の高いところに位置する天文台の常用電力 は、大電力を供給するほどの出力を持てないため、何らかの"バッテリー"を取り付けた大 電力供給システムを作る必要がある。ここでいう大電力供給システムとは、通常運転を行っ ているときには"バッテリー"へエネルギーを充電し、高速回転を行うときにはそこからエ ネルギーを取り出して、数百 kW の出力を可能にするようなシステムである。

^{*1} 有効面積が小さいことによる統計不足および、スレッショルドエネルギーが高いことによる感度不足。

^{*2} 図 2.18 左上グラフ参照。

^{*3} 具体的な計算は第6章で行う。



図 4.1 フライホイールの図。http://apps.geindustrial.com/publibrary/ checkout/DEA-642?TNR=Brochures%7CDEA-642%7CPDF&filename=DEA-642. pdfより引用。(a) 装置全体図。(b) 真空容器拡大図。

■フライホイールの必要性

本電源システムは、大電力供給機能のための"バッテリー"としてフライホイール*4を導入している。図 4.1 が示すように、フライホイールは真空容器の中に、磁力によって宙に浮いた金属が高速で回っている装置である。充電するときには、フライホイール装置が電気エネルギーを力学的な回転エネルギーに変換する。また、放電するときには、その逆である。

一般の化学的なバッテリーの代わりに、フライホイールのような力学的なバッテリーを 導入するメリットを説明する。フライホイールは、内部抵抗が化学的なバッテリーと比べ て小さいので、大電力を出すために必要とされる装置の大きさがコンパクトなサイズで済 む。また、フライホイール装置の回転部分は物理的な接触点がなくて低抵抗なため、CTA の運用年数の間、部品を交換することなく蓄電機能を維持することができる*⁵。

しかしながら、フライホイールを用いたこのような大電力供給装置は、日本ではほとんど 使われておらず、特に望遠鏡への実装は世界で初めてなので、詳細な試験が必要とされる。

50

^{*4}日本語では弾み車(はずみぐるま)と呼ばれる。

^{*&}lt;sup>5</sup> CTA の運用年数は 20 年間で、フライホイールの使用年数はその期間をカバーしている。一般に ~5 年で 寿命が来る化学バッテリーだと運用中に何度もバッテリーの交換をしなければならない。



図 4.2 システム全体図。https://www.calnetix.com/sites/default/files/ CA_VYCON_VDC_BROCHURE_ENGLISH_%20WEB_6_15_16.pdfの図を改変。出力に対 して入力に余裕があるときは、UPS コントローラーからフライホイールへ電力を充電す る。入力だけでは出力がまかなえないときは、フライホイールから電力を取り出す。常 用電力が切れた場合、非常用発電機が始動して安定になったことを確認したあと、自動ス イッチによって入力先が切り替わる。LST が減速する時に発生する回生エネルギーは、 抵抗装置で消費される。

4.2 電源システム全体像

図 4.2 は電源システムの全体像について示している。電源システムは、図 4.2 中の"LST" と"Braking Registers"を除いた全ての装置および、モニタリングシステムの総称である。 電源システムを統括する装置が、UPS コントローラー(図中の"UPS System"で囲った領 域) である。UPS コントローラーは、

- 入力(常用電源もしくは非常用発電機)
- 蓄電装置(フライホイール)
- 出力 (LST)

と接続しており、状況に応じて適切な電力を出力先に供給する。

入力側には "Automatic Transfer Switch" があり、普段は常用電源に接続されている。停

電が発生すると、非常用発電機*⁶が作動してスイッチが自動的に発電機側に切り替わる*⁷。 さらなる詳細は、Appendix E を参照されたい。

4.3 無停電電源装置(Uninterruptible Power Supply, UPS)

電源システムの主装置である無停電電源装置について述べる。無停電電源装置は

- UPS コントローラー
- フライホイール (二つ)

からなり、

- 無停電電源機能
- 大電力供給機能

という二つの役割がある*⁸。

UPS コントローラーは

- Rectifier (交流直流変換装置)
- Inverter (直流交流変換装置)

を持ち、それぞれ入力、出力側につながっている。入力側の電力の最大値は 46 kW に制限 されている*9。停電時もしくは大電力出力の際に UPS コントローラーが入力側の電力遮断 もしくは電力不足を感知すると、フライホイールから電力を取り出して出力を補填する。

4.4 フライホイール (Flywheel)

4.1 節で述べたように、フライホイール*¹⁰は力学的回転エネルギーとしてエネルギーを 蓄える装置である。フライホイールのローターは図 4.1(b) が示すように、下は永久磁石、 上は電磁石によって、真空容器中で磁気浮上しながら回転している。フライホイールは一 つあたり 4.2 MJ のエネルギーを蓄えられ、一つあたり 300 kW の放電が可能である。 フライホイールが示すパラメータとして

^{*&}lt;sup>6</sup> 英語では Genset と表現する。

^{*7} 停電から発電機側への切り替え所要時間は 15 秒程度である。

^{*8} それぞれの機能の動作確認テストを第5章と第7章で行う。

^{*9} この電力は、出力、フライホイールの充電、UPS コントローラーとフライホイールの運転電力に使われる。
*¹⁰ 略記として "FW" と表現している場合がある。

- •エネルギー残量(単位:%)*11
- 容器内真空度 (単位:mTorr)

などが挙げられるが、特に重要な値がエネルギー残量である。

スイスにて、フライホイールの稼働試験を行った際*¹²、エネルギー残量が0% に達した 後、装置内部のブレーカーが落ちて、フライホイールの電源が切れることがわかった。そし て、フライホイールを再始動するためには、ブレーカーを直接手で上げなければならないと いう問題点が生じた。再始動まで外部からのフライホイールとの通信ができなくなる危険 性を考えると、このようなエネルギーを全て使い切る状況は避けるべきである。

したがって、エネルギー残量を 0% にさせないことを最優先にした電源システムを構築 する必要がある。

4.5 モニタリングシステム

- UPS コントローラー
- フライホイール
- •エネルギーコンテナ*13の温湿度計
- 各ブレーカー

は図 4.3(a) が示すように、監視装置と接続されている*¹⁴。監視装置は Modbus プロトコ ルを用いて装置と通信する。その監視装置はイーサネットでエネルギーコンテナの外につ ながっており、TCP/IP 通信によって遠隔から、電源システムを構成する各装置のパラメー ターを読み取ることができる*¹⁵。

図 4.3(b) は試験のために構築したモニタリングシステムのセットアップである。パソコ ンを天文台に設置して、TCP/IP 通信により監視装置へ接続し、常に各装置の情報を読み取 るようなプログラムを作成した。読み取った値を用いて解析を行う。

モニタリングシステムの詳細は、Appendix E を参照されたい。

- *13 エネルギーコンテナは計4コンテナある。一つのエネルギーコンテナの中に電源システムが一つある。
- *14 その他、エアコン、火災報知器なども接続されている。

^{*&}lt;sup>11</sup> 英語では Available Energy と表現する。例えばエネルギー残量 70% は、エネルギー残量 4.2 × 0.7 MJ を 意味する。

^{*12} 実施日:2017年9月28日。

^{*&}lt;sup>15</sup> 監視装置はバッテリーを備えているので、停電が起きても遠隔からの情報読み取りを行うことができる。





図 4.3 構築したモニタリングシステムの図。(a) 監視装置配置図。(b) 監視装置に接続 するために構築したモニタリングシステム。

4.6 ドライブシステム(電源システム外部)

ドライブシステムは、電源システムの出力側に直接接続するシステムである。ドライブシ ステムは LST を回転させるためのモーターの制御装置と減速時に発生する回生エネルギー を消費するための抵抗装置(Braking Registers)からなる。

ドライブシステムは電源システムの外部ではあるが、電源システムの出力電力を決める ので、電源システムの開発研究のためにドライブシステムを理解することも必要である。

■モーター

ドライブシステムは、望遠鏡の回転のために電源システムからの電力を使用してモー ターを回転させる。モーターは

54

- ・方位角回転用:4つ

搭載されている。モーターには、「定格電力」および「定格トルク」という値*¹⁶が製品カタ ログにて記載されている。定格電力は、モーターひとつあたり

- 方位角回転用: 84 kW
- 仰角回転用: 10.5 kW

であり、定格トルクは、モーターひとつあたり

- 方位角回転用: 320 Nm
- 仰角回転用: 50 Nm

である。これは "継続的に" モーターが出せる電力およびトルクを示している。瞬間的には 定格の 3-4 倍の出力が可能である。

モーターは減速機に接続されておりトルクを増大させる。そのギア比は

- 方位角回転用:18
- 仰角回転用: 85.5

である。減速機は望遠鏡の構造体と Rack & Pinion *17によって接続され、そのギア比は

- 方位角回転用:72
- 仰角回転用:28

である。

■抵抗装置

LST が減速回転するときに発生する回生エネルギーは抵抗器に送られて、そこで消費される。抵抗装置は

- 方位角回転用:4つ
- 仰角回転用:2つ

搭載されており、それぞれ、回生電力および回生エネルギー上限値の合計を上回らないよう にしなければならない。抵抗器一つあたりの許容最大回生電力 *P*_{reg_lim} および許容最大回 生エネルギー *E*_{reg_lim} は、それぞれ、

^{*&}lt;sup>16</sup> 英語ではそれぞれ Rated Power, Rated Torque と表現する。

^{*&}lt;sup>17</sup> Rack & Pinion は減速機の回転の動きを並進運動に変換する。

- $P_{\text{reg_lim}} = 100 \,\text{kW}$
- $E_{\text{reg_lim}} = 200 \,\text{kJ}$

である。

また、回生エネルギー消費後は、温度が上昇した装置を冷却しなければならないので、一 定時間は再び回生エネルギーを消費してはならない。必要とされる待ち時間は、

- 抵抗器一つあたり $E_{\text{reg}} = 100 \,\text{kJ}$ 消費後の待ち時間は 68 sec
- ・抵抗器一つあたり $E_{\rm reg} = 200 \, {\rm kJ}$ 消費後の待ち時間は 460 sec

である。

第5章

【結果 a】

停電状況を想定した無停電電源機能 試験

第5章から第9章までは、CTA大口径望遠鏡高速回転電源システム開発のために実施した試験結果およびその解析結果についてまとめる。

第4章でまとめたように、電源システムは UPS コントローラーと二つのフライホイール を主とするシステムである。これらの装置の振る舞いを読み取るために、モニタリングシ ステムを構築した*¹。

この章では、電源システムの一つの機能である無停電電源機能について述べる。CTA 天 文台は北サイト*²南サイト*³ともに、電気インフラが不安定な標高の高いところに位置する ため、時折瞬間的な停電が起こることがわかっている。本電源システムは無停電電源機能 により、停電による常用電源の電力遮断を検知すると、直ちに UPS コントローラーがフラ イホイールのエネルギーを取り出して出力側に供給する。この機能が正常に動作すること を確認するため、実際にラ・パルマの天文台で、停電を想定した装置試験を行った。

5.1 停電試験内容

停電状況を実現するための試験セットアップについて説明する。 まず言葉の定義として、

^{*1 4.5} 節参照。

^{*&}lt;sup>2</sup> 北サイト:スペイン領、ラ・パルマ島 (2200m)。

^{*&}lt;sup>3</sup> 南サイト:チリ、パラナル (2200m)。



VYCON VDC (Flywheel)

図 5.1 停電試験のセットアップ。https://www.calnetix.com/sites/default/ files/CA_VYCON_VDC_BROCHURE_ENGLISH_%20WEB_6_15_16.pdfの図を改変。入 力側のブレーカーを人為的に手で開けることによって、UPS は無停電電源モードに移行 する。

• LST への出力電力: Pout

- UPS コントローラーが運転するための電力: PUPS
- フライホイールが運転するための電力: P_{FW}

の3変数を導入する。

この試験*⁴では図 5.1 が示すように、人為的にエネルギーコンテナ内の全装置へつながる 入力ブレーカーを開けた*⁵。これにより、UPS コントローラーは常用電源がなくなったと 判断し、代わりにフライホイールから電力を引き出す。二つのフライホイールは合わせて

$$P_{\rm tot} := P_{\rm out} + P_{\rm UPS} + P_{\rm FW} \tag{5.1}$$

の電力 Ptot を蓄えていたエネルギーから取り出す。

5.2 停電試験結果

図 5.2 は、モニタリングシステムを用いて読み取った停電試験の結果を示している。(a) は二つのフライホイールから読み取ったエネルギー残量である。(b), (c) は UPS コント

^{*4} 実施日:2018年11月22日。

^{*5} モニタリングシステムの停電時の振る舞いは 4.5 節参照。


図 5.2 停電試験結果。上はフライホイールが示すエネルギー残量。中央は UPS コント ローラーから二つのフライホイールへ供給される電力。下は電源システムの出力。



図 5.3 停電試験結果のフィッティング。停電時におけるフライホイールごとのエネ ルギー残量の変化を、一次関数でフィッティングした結果。フィッティング範囲は 10:58'00"-11:00'40" である。

ローラーから読み取った値で、それぞれ

- UPS コントローラーから二つのフライホイールへ供給される電力*6。
- 電源システムの出力*⁷。

に対応する。10:57-11:03 が、ブレーカーを開けていた時間である。電源システムが無 停電電源モードとして振る舞い、フライホイールのエネルギーが減っている。"Power to Flywheel" が負値を示し、UPS コントローラーに電力を供給していることがわかる。11:03 からは再びブレーカーを手で閉じたため、電源システムは通常モードに戻り、再充電の挙動 が確認できる。

ここからは *P*_{UPS} と *P*_{FW} を求めるための解析と結果を説明する。まず、フライホイール から引き出された電力 *P*_{tot} を求める。図 5.3 はフライホイール放電時の点と誤差を用いて

^{*6} 負値の場合フライホイールから UPS コントローラーへ供給される電力を意味する。

^{*7} Rectifier 側が入力側で、Inverter 側が出力側(図 5.1 参照)。

フィッティングした結果を示している*8。二つのフライホイールでそれぞれ、

- -0.00142/sec
- -0.00145/sec

のエネルギー減少がみられる。フライホイールは 4.2 MJ のエネルギーを蓄えられるので、

$$P_{\rm tot} = 4.2 \,\text{MJ} \times (0.00142 + 0.00145)/\text{sec} \simeq 12.1(5) \,\text{kW}$$
 (5.2)

とわかる。続いて無停電電源モード中(10:58'00"-11:00'40")の図 5.2 (b) が示す値 「-8.69(5) kW」は電源システム出力 P_{out} と UPS コントローラ運転用電力 P_{UPS} に対応 する。つまり、

$$P_{\rm out} + P_{\rm UPS} = 8.69(5) \,\rm kW$$
 (5.3)

となる。図 5.2 (c) の同時刻での値はそのまま出力に対応し、

$$P_{\rm out} = 4.94(2) \,\rm kW$$
 (5.4)

である。

式 (5.2)、式 (5.3)、式 (5.4) から

$$P_{\rm UPS} = 3.75(5)\,\rm kW \tag{5.5}$$

$$P_{\rm FW} = 3.4(5)\,\rm kW \tag{5.6}$$

と算出される。

■注:無停電電源モード中の出力変化

図 5.2 (c) を見ると無停電電源モード中に出力が増加していることがわかるが、この領域 は計算に使用しなかった。この点について言及しておく。

図 5.4 はテスト当日の出力電力ログである。同様の出力増加が多数みられる。この結果 から、テスト中の出力増加は無停電電源モードによって引き起こされた現象ではないとい う判断をして出力が安定している領域のみを計算に使用した。*⁹。

5.3 得られた知見

この試験によって得られた重要な知見をここにまとめる。

停電が起きたとき、UPS は無停電電源モードとなり、安定に電力を供給できることがわかった。しかし LST 用の出力 Pout に加えて、余分に

$$P_{\rm UPS} + P_{\rm FW} = 7.2(5)\,\rm kW \tag{5.7}$$

^{*8} 誤差の決定とフィッティングの詳細は 7.3 節、7.4 節を参照されたい。

^{*9} 周期的に起きている出力増加の原因は、ドライブシステムを開発したグループに尋ねる必要がある。



図 5.4 長時間の電源システム出力変化。30 分程度に一度出力の増加が見られる。この 結果から出力の増加は停電とは関係ないことがわかる。

の電力が必要である。

LST が高速回転中ではないときに必要とする電力は、 $P_{out} = 22 \, \text{kW}$ と見積られている が、停電中は 7.2 kW も考慮して $P_{tot} = P_{out} + P_{UPS} + P_{FW} \sim 30 \, \text{kW}$ 程度のエネルギー 消費が見込まれる。したがって二つのフライホイールがエネルギーを供給できる時間

$$T_{\rm pow\ cut} = 4.2\,{\rm MJ} \times 2 \div (30\,{\rm kW}) \sim 280\,{\rm sec}$$
 (5.8)

~4 分以内に LST をパーキングポジションに停止する必要がある。もしくは、非常用発電 機モードが正常に作動しており、かつ発電機が十分な燃料を持っていることを確認する必 要がある。

5.4 まとめ

- 無停電電源機能を確認するために、停電を想定した試験を実施した。
- 停電状況を再現するために、人為的にエネルギーコンテナ内の全装置へつながる入 カブレーカーを開けた。
- •6分間ブレーカーを開けて試験を行った。

- 無停電電源機能が正常に作動することを確認した。
- しかし LST 用の出力 Pout に加えて、余分に 7.2(5) kW の電力が必要である。
- 無停電電源機能が正常に作動することを確認した。
- 停電が起きたら、~4 分以内に LST をパーキングポジションに停止させなければな らない。
- もしくは、非常用発電機モードが作動しており、発電機の燃料が十分にあることを確認しなければならない。

第6章

【結果 b】

望遠鏡高速回転における最大電力の 推定

第5章では、CTA 天文台は常用電源が停電した場合でも、本電源システムにより無停電 電源状態が維持できることを示した。一方で電源システムは、ガンマ線バースト即時放射 を測定するための望遠鏡高速ポインティングも目的としている*¹。ポインティングする時 の回転角速度は、通常運転時回転角速度に比べて数千倍速いため*²、望遠鏡が必要とする最 大電力も通常運転時と比べて格段に大きくなることが予測される。

この章では、望遠鏡の構造体をモデル化して、高速回転時に電源システムが供給するべき 最大電力*³がどの程度になりうるか議論する。

6.1 章の流れ

- 最大回転角加速度、最大回転角速度および回転所要時間を定義し、時間ごとのLST
 回転角加速度、回転角速度の挙動を決める。
- LST をモデル化して、想定しうる各エネルギー変化率を算出する。
- 高速回転に必要な仕事率を算出する。
- •電源システムが供給するべき仕事率を算出する*4。

^{*1 4.1} 節参照。

^{*&}lt;sup>2</sup> $\omega_{\text{normal_obs}} \sim (15^{\circ}/\text{h}) \div (60^{\circ}/\text{rad}) \div (3.6 \times 10^3 \text{ sec/h}) \sim 10^{-4} \text{ rad/sec}_{\circ}$

^{*3} 摩擦や風も含めた最大条件(最悪条件)。

^{*&}lt;sup>4</sup>「電源システムが供給するべき仕事率」は「高速回転に必要な仕事率」よりも、電源システム出力から LST までのエネルギー減少分(効率、Efficiency)だけ余分に大きい必要がある。また、「電源システムが供給す るべき仕事率」には高速回転のための仕事率だけでなく、カメラや冷却機等に供給するべき仕事率も含まれ

(A)

(B)



図 6.1 LST の回転挙動を示した図。【左】方位角方向。【右】仰角方向。上から順に、回 転角加速度、回転角速度、回転角度。

• その他、トルク(6.6 節)、回生電力(6.7 節)、向かい風条件(6.9 節)の言及がある。

6.2 望遠鏡の回転挙動定義

LST は方位角*⁵方向と仰角*⁶方向の二軸回転によってポインティングを行う。これら二 軸の高速回転をどのような角加速度および角速度に従いながら実行するのかこの節で議論

66

る(詳細は 6.8 節参照)。

^{*&}lt;sup>5</sup> 英語では Azimuth と表現する。

^{*6} 英語では Elevation と表現する。

する。

電源システムは、LST がいかなる方向にも 20 秒以内にポインティングするための電力 を供給する。よって最大電力は次の状況で実現すると想定される。

方位角回転角度*⁷
$$\Delta \varphi = 180^{\circ}$$
 (6.1)

仰角回転角度
$$\Delta \theta = 65^{\circ}$$
 (6.2)

回転所要時間
$$T_{\rm rot} = 20 \, {\rm sec}$$
 (6.3)

この回転のための最大回転角速度 ω_{max} 、最大回転角加速度 $\dot{\omega}_{max}$ および角躍度 $\ddot{\omega}$ *⁸を決定 する。まずこの章では暫定的に*⁹、ドライブシステム開発チーム*¹⁰が決めた値を用い、方 位角に関して

$$\omega_{\rm max} = 0.23 \, \rm rad/s \tag{6.4}$$

$$\dot{\omega}_{\rm max} = 0.047 \, \rm rad/s^2 \tag{6.5}$$

とする。(仰角に関しては上記値を $\frac{65}{180}$ 倍する。)図 6.1 が示すように、LST は $\ddot{\omega}$ に従いな がら $\dot{\omega}_{max}$ まで角加加速し、 $\dot{\omega}$ に従いながら ω_{max} になるまで角加速する。減速も同様に行う。式 (6.1) と式 (6.3) を満たすように角躍度(角加加速度)は

$$\ddot{\omega} = \dot{\omega}_{\rm max} / (1.4 \text{ sec}) \tag{6.6}$$

と決まる。1.4 秒は最高角加速度に達するまでの時間で、ここでは語を jerk time と定義 する。

6.3 回転エネルギー時間変化率

続いて 6.2 節により定まる、回転エネルギーの時間変化率について計算する。 回転系の運動方程式は

$$I\dot{\omega} = T - T_{\rm f} \tag{6.7}$$

とかける。ここで、

- I: 慣性モーメント
- T:外トルク*¹¹

- *¹⁰ フランスのグループ。
- *11 質点系の外力に相当。

^{*&}lt;sup>7</sup> 英語では Displacement と表現する。

^{*&}lt;sup>8</sup> 角躍度は角加速度の時間変化率(トルク時間変化率に相当)であり、機械や人間の負荷を減らすために、角 加速度を有限の時間で変化させる物理量として導入する。今は回転系の議論をしているが、質点系なら力の 時間変化率に相当し、加加速度(英語では jerk)とも呼ばれる。

^{*9} 最高角加速度および最高角速度の定義拡張は第8章で行う。



図 6.2 LST の回転エネルギー時間変化率。上から順に、方位角の回転エネルギー時間 変化率、仰角の回転エネルギー時間変化率、二つの合計。

• *T*_f:摩擦によるトルク

である。式 (6.7) の両辺に ω をかけることで、LST 高速回転のために必要な仕事率 P_{LST} は次のように表現される。

$$P_{\rm LST} = T\omega$$

= $I\dot{\omega}\omega + T_{\rm f}\omega$ (6.8)



図 6.3 LST の転がり摩擦によるエネルギー変化率。【左】方位角回転。【右】仰角回転。 上から順に、自重の転がり摩擦によるエネルギー変化率、風圧の転がり摩擦によるエネ ルギー変化率、二つの合計。"Max Pow"および"Max Ene"はそれぞれ「電源システム が供給すべき総仕事率」が最大となる条件およびその積分値(つまりエネルギー)が最 大となる条件。

ここで I は LST 構造体に関する資料を用いて、

- $I_{azi} = 13,100 \text{ ton } \text{m}^2$
- $I_{\rm ele} = 5,140 \,{\rm ton}\,{\rm m}^2$

と決定する。資料は Appendix D にまとめる。

図 6.2 はこれら *I* を用いて計算した LST の回転エネルギー時間変化率 *I* $\omega\omega$ である。この結果から *I* $\omega\omega$ は最大角加速度を終える時間(~5 sec)に最大となることがわかる。

6.4 摩擦によるエネルギー時間変化率

次に 6.3 節の回転エネルギー時間変化率以外に余分に必要な摩擦トルク T_f 全要素について議論する。摩擦要素は

- 自重および風圧による転がり摩擦トルク
- 風圧によるトルク

が考えられる。以下、順に説明する。

■自重による転がり摩擦

自重による転がり摩擦力 Froll は垂直抗力 Fnor := Mg を用いて

$$F_{\rm roll} = C_{\rm rr} F_{\rm nor} \tag{6.9}$$

で与えられる。それを用いて転がり摩擦によるトルクは

$$T_{\rm f} = F_{\rm roll} R \tag{6.10}$$

で算出される。Crr は転がり抵抗係数*12、R は回転軸からの距離*13である。

ここで方位角、仰角の回転に関わるそれぞれの自重 M を、Appendix D にまとめた資料 から

- $M_{\rm azi} = 122.2 \, {\rm ton}$
- $M_{\rm ele} = 60.1 \, {\rm ton}$

と決定する。M による摩擦トルク $T_{\rm f}$ がボギーのレール(方位角)と回転軸のボールベアリング(仰角)にかかる。 $T_{\rm f}\omega$ の計算結果は図 6.3(上)で与えられる。

■風圧による転がり摩擦

LST が運転可能な最悪の強風条件は 10 分間の平均風速 36 km/h である。これは、 Appendix B での計算によると、1 秒の瞬間風速 u = 60 km/h に相当する。このときの風 圧を求める。地面に平行な風が LST の鏡に当たることで及ぼす力 F_{nor} は

$$F_{\rm nor} = C_{\rm d} \, \frac{1}{2} \rho u^2 (S \sin^2 \theta) \tag{6.11}$$

^{*&}lt;sup>12</sup> 英語では Rolling Registance coefficient。ここでは $C_{rr} = 0.005$ (Rail), 0.002(Ball Bearing) としている。 *¹³ R = 12 m(Bogies), 1 m(Otherwise) としている。



図 6.4 LST 構造体のモデル図。LST を上から見た図、正面から見た図、横から見た図 をそれぞれ示す。計算に使われる変数 θ, φ は以上のように定義される。風によるトルク は片面に風が当たることで生じるとする。

と求まる。S は LST 鏡の面積*¹⁴、 ρ は空気密度*¹⁵、 C_d は抵抗係数*¹⁶、 θ は天頂角*¹⁷である。以下自重による摩擦と同様で、摩擦トルク T_f がボギーのボールベアリング(方位角)と回転軸のボールベアリング(仰角)にかかる。 $T_f \omega$ の計算結果は図 6.3(中)で与えられる。

^{*&}lt;sup>14</sup> $S = \pi \times (12 \,\mathrm{m})^2$ と定義。

^{*&}lt;sup>15</sup> 高度 2200 m での密度 $\rho := 0.98641 \text{ kg/m}^3$ とした。U.S. Standard Atmosphere (1976 ver.) 参考。

^{*&}lt;sup>16</sup> 英語では Drag coefficient という。短円柱を仮定し $C_d = 1.2$ としている。

^{*17} 図 6.4 参照。



【結果b】望遠鏡高速回転における最大電力の推定

第6章

図 6.5 LST の摩擦によるエネルギー変化率。【左】方位角回転。【右】仰角回転。上か ら順に、転がり摩擦によるエネルギー変化率、風のトルクによるエネルギー変化率、二 つの合計。

■風によるトルク

方位角回転時の向かい風によるトルクTf を計算する。風は図 6.4 が示すように、

- LST 鏡の右半面に風が当たる。
- 鏡が向く方位角と風向のなす角 $\varphi = 0^\circ$ になるタイミング*¹⁸が、回転エネルギー時 間変化が正に最大となるタイミングと一致する。

72

^{*&}lt;sup>18</sup> つまりトルク最大のタイミング。

の二点を満たすように決める。 φ, θ は図 6.4 で定義された通りである。この時の摩擦トル ク $T_{\rm f}$ は、

- 鏡半径 r := 12 m
- 圧力 $p := C_d \frac{1}{2} \rho u^2$

とすると、

$$T_{\rm f} = \int_{[{\rm SemiCircle R.}]} x \, \mathrm{d}F \cos\varphi$$

$$= \int_{[{\rm SemiCircle R.}]} p \, x \, \mathrm{d}S \, \cos^2\varphi \sin\theta \quad (\because \mathrm{d}F = p \, \mathrm{d}S \cos\varphi \sin\theta)$$

$$= p \cos^2\varphi \sin\theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^r (r\cos\psi) \, \mathrm{d}r \, r \, \mathrm{d}\psi$$

$$= p \cos^2\varphi \sin\theta \int_{-1}^1 \mathrm{d}(\sin\psi) \int_0^r r^2 \, \mathrm{d}r$$

$$= p \cos^2\varphi \sin\theta \frac{2}{3}r^3$$
(6.12)

である。例えば、風によるトルクのピークの値は、式 (6.12) に

• $\varphi = 0^{\circ}$

•
$$\theta = 55^{\circ}$$

を代入すると、 $T_{\rm f} \simeq 1.6 \times 10^5 \, \text{Nm}$ となる。仰角回転時のトルクも下半面に風が当たるとして同様に計算を行うと $T_{\rm f\ ele} = T_{\rm f}$ となる*¹⁹。 $T_{\rm f} \omega$ の結果を図 6.5(中)に示す。

また図 6.5 (下) が示しているのは、求めた三種の摩擦によるエネルギー時間変化率 $T_{\rm f} \omega$ 合計値である。

6.5 望遠鏡高速回転に必要な仕事率

式 (6.8) $P_{\text{LST}} = I\dot{\omega}\omega + T_{\text{f}}\omega$ より 6.3 節と 6.4 節で導出した $I\dot{\omega}\omega$ と $T_{\text{f}}\omega$ を代入して望 遠鏡高速回転に必要な仕事率 P_{LST} を算出した。結果を図 6.6(下)に示す。

^{*&}lt;sup>19</sup> 右半面に風が当たる(方位角にトルクがかかる)状況と下半面の(仰角にトルクがかかる)状況は同時には 起こらないことに注意。





図 6.6 LST 高速回転に必要な仕事率。【左】方位角回転。【右】仰角回転。上から順に、 回転エネルギー時間変化率成分、摩擦によるエネルギー変化率成分、二つの合計(高速 回転に必要な仕事率)。

6.6 望遠鏡にかかるトルク

この節では、6.5節で算出した仕事率 PLST の結果から、LST を高速回転させる際に自身 の歯車にはたらくトルク*20を求める。

式 (6.8) より、LST の歯車にかかるトルクTは、

$$T = P_{\rm LST}/\omega \tag{6.13}$$

^{*&}lt;sup>20</sup> モーターと LST が歯車によってどのように接続しているかは 4.6 節を参照。



図 6.7 高速回転で LST にかかるトルク。【左】方位角回転。【右】仰角回転。上から順 に、高速回転に必要な仕事率、回転速度、高速回転で LST にかかるトルク。

となる。この結果を図 6.7 に示す*21。

6.7 回生電力および回生エネルギー

図 6.8 (上) は、6.5 節で得た方位角と仰角それぞれの回転のために LST が必要とする 仕事率 P_{LST} である*²²。LST が減速すると、 P_{LST} が負をとる時が存在する。これはモー ターに与えるべき仕事率がもはや無くなり、むしろ逆にモーターが発電機のように振る舞

^{*&}lt;sup>21</sup>この節の議論は 8.6 節に続く。

^{*22}図6.6(下)と同図。





図 6.8 回生電力および回生エネルギー(向かい風)。【左】方位角回転。【右】仰角回転。 上から順に、高速回転に必要な仕事率、回生電力、回生エネルギー。

い電力が発生していることを意味する。これを回生電力 Preg *23といい、図 6.8(中) に示 す。また P_{reg} の積分結果を、回生エネルギー $E_{\text{reg}} *^{24}$ として図 6.8(下)に示す。この議論 は 6.9 節に続く。

76

^{*&}lt;sup>23</sup> 英語では Regenerative Power と表現する。

^{*&}lt;sup>24</sup> 英語では Regenerative Energy と表現する。



図 6.9 電源システムが供給すべき高速回転のための仕事率。【上】電源システムが供給 すべき回転エネルギー時間変化率成分。【中央】電源システムが供給すべき摩擦によるエ ネルギー変化率成分。【下】二つの合計(電源システムが供給すべき高速回転のための仕 事率)。



図 6.10 電源システムが供給すべき電力。【上】電源システムが供給すべき高速回転の ための仕事率。【中央】負の値を 0 にしたもの(回生電力は抵抗器で消費されるため)。 【下】他の装置に供給すべき電力 45 kW を足したもの(電源システムが供給すべき電力)。

6.8 高速回転中、電源システムが供給すべき総仕事率

6.5 節の P_{LST} を用いて、最後に電源システムが供給するべき総仕事率を算出する。ここでは次の二つの手順を踏む。

- PLST を用いて、電源システムが供給するべき高速回転のための仕事率を算出する。
- カメラや冷却機等の他装置に供給するべき仕事率を足しあわせ、電源システムが供給するべき総仕事率を導出する。

■電源システムが供給するべき高速回転のための仕事率

前半の手順として、まず、「効率 (Efficiency)」という語を導入する。「効率」は次の式で 定義される。

ここで定義した、右辺分子項 *P*_{LST} は、6.5 節で求めた方位角と仰角の仕事率の合計を意味 している*²⁵。

上式を見ると、「効率」は電源システム出力から LST まで*²⁶の、エネルギーロスに相当 していることがわかる。エネルギーロスは、カタログの値や物理モデルを用いて計算する。 Appendix C でまとめた計算によって、効率を e = 0.71 と定義する。

式 (6.14) を用いて算出した、「電源システムが供給するべき高速回転のための仕事率 P_{out rot}」の結果を、図 6.9(下)に示す。

■電源システムが供給するべき高速回転のための仕事率

一方、高速回転で他装置が必要とする電力は 45 kW と見積もられている*²⁷。したがって 電源システムが供給するべき総仕事率 P_{out} は

$$P_{\rm out} := P_{\rm out_rot} + 45 \,\rm kW \tag{6.15}$$

と求まり、図 6.10 に示す。この結果から、Pout の最大値は、

$$P_{\rm out} \simeq 300 \,\rm kW \tag{6.16}$$

と推定される。

*²⁶ より具体的には、LST を回すために自身に取り付けられている歯車まで。

^{*25} 風によるトルクが方位角にかかる状況を適用(注*19参照)。

^{*&}lt;sup>27</sup> Active Mirror Controll:16 kW, Camera:9 kW, Chiller:9 kW, etc.



図 6.11 向かい風条件との変更点。(A) 仰角回転。図 6.1(B) から、回転角度方向を反転 させている。(B) 方位角:転がり摩擦によるエネルギー変化率。(C) 仰角:転がり摩擦に よるエネルギー変化率。図 6.3 から、風向きを反転させ、ピークのタイミングも変更し ている。

6.9 向かい風ではなく追い風条件での回生電力および回生エ ネルギー

この節では、風が向かい風ではなく追い風の場合を考える。これを想定する理由は、追 い風条件の時に 6.7 節で算出した回生電力および回生エネルギーが最大をとるからである。 両値が最大となる追い風条件は、これまでの設定のうち次の三点が変更されることにより 達成される。

- 6.4 節の「風によるトルク」で風向きを反対向きにする (図 6.11(B)(C)の中央図を 参照)。
- LST 鏡が向く方位角と風向のなす角 $\varphi = 0^{\circ}$ になるタイミングが、回転エネルギー時間変化が負に最大になるタイミングと一致する。(図 6.11(B)(C)の中央図を参照)。
- 6.2 節で仰角方向の回転移動が 0° から 65° になる (図 6.11(A)の下図を参照)。

80



図 6.12 回生電力および回生エネルギー(追い風)。【左】方位角回転。【右】仰角回転。 上から順に、高速回転に必要な仕事率、回生電力、回生エネルギー。追い風条件の方が 向かい風条件よりも、回生電力および回生エネルギーが大きくなることに注意。

上記の変更を施し、6.3 節から 6.7 節までと同様の計算を行う。ここで、図 6.12(中、下) が示しているものが、想定しうる回生電力および回生エネルギーの最大値である*²⁸。この 結果から、特に、方位角での回生電力 $P_{\text{reg_azi}}$ および回生エネルギー $E_{\text{reg_azi}}$ の最大値は、

$$P_{\rm reg_azi} \simeq 130 \,\rm kW$$
 (6.17)

$$E_{\rm reg_azi} \simeq 400 \,\rm kJ$$
 (6.18)

と推定される。

(A)

(B)

^{*&}lt;sup>28</sup>回生電力は 4.6 節で述べたように、ドライブシステム内に搭載されている抵抗器(Braking Register)に流 れて、そこですべて消費される(エネルギー流れの詳細は「図 4.2」参照)。



図 6.13 電源システムが供給すべき電力および減速時の回生電力。(a) 電源システムの 出力電力。(b) 減速時の回生電力(方位角)。どちらも値が最大になる条件。最悪な条件 では、ピーク時の電力は 300 kW となり、ピーク時の回生電力は方位角で 130 kW と なる。

6.10 まとめ

- GRB 即時放射を測定するために、LST 高速ポインティングで必要な電力を、以下の 条件によって算出した。
 - LST の構造体をモデル化して、回転の振る舞いを定義した。
 - 回転エネルギー時間変化に加え、摩擦によるエネルギー損失の効果だけ余分に
 電力を供給しなければならない。
 - 摩擦の要素は転がり摩擦および風圧によるトルクとした。
 - 電源システムから LST までのエネルギー輸送「効率」分だけ余分に電力を供給 しなければならない。
 - 他の装置に供給するべき仕事率だけ余分に電力を供給しなければならない。
- 図 6.13(a) が示すように、最悪な条件では、供給するべき最大電力は $P_{\rm out} \simeq 300 \, {\rm kW}$ と推定される。
- 他に、図 6.13(b) が示すように回生電力を以下のように推定した。
 - 最悪な条件では、減速時に消費するべき最大の回生電力は方位角で、 $P_{\text{reg}azi} \simeq 130 \,\text{kW}$ と想定される。
 - このときの回生エネルギーは $E_{\text{reg_azi}} \simeq 400 \,\text{kJ}$ である。

第7章

【結果 c】 望遠鏡高速回転を想定した 大電力供給機能試験

この章では、第5章での試験に加えてラ・パルマの天文台で行ったもう一つの試験結果 を説明する。第6章での計算結果から、望遠鏡高速回転の電力は~300kW にのぼるため、 常用電力だけでなくフライホイールのエネルギーも併せた電力供給が必要なことがわかっ た*¹。

しかしながら、第4章で述べたように、フライホイールを搭載した電源システムの望遠 鏡実装例は世界初であるため、その挙動を詳細に理解する必要がある。したがって、大電力 供給機能が、正常に動作するか検証することは必要不可欠である。高速回転の状況を再現 するために、擬似負荷*²を電源システムの出力側に接続して、フライホイールからの大電力 供給試験を実施した。

7.1 擬似負荷と試験セットアップ

具体的に、擬似負荷を用いた試験セットアップについてこの節で述べる。

用いる擬似負荷は巨大なヒーター装置で、最高 500 kW まで負荷が設定可能な可変抵抗 器である(図 7.1(a))。擬似負荷にはコントローラーが付いており、1 kW 単位で負荷値を 設定できる(図 7.1(b))。これを図 7.2 で示すように LST の代わりに接続してフライホイー ルの放電テストを行い、結果をモニタリングシステムで読み取った*³。

^{*1} エネルギー流れの詳細は「図 4.2」参照。

^{*&}lt;sup>2</sup> 英語では Dummy Load と表現する。

^{*3} モニタリングシステムについては 4.5 節参照。





図 7.1 試験に用いた擬似負荷の図。(a) 擬似負荷装置。最高 500 kW までの負荷を設定 可能。(b) 擬似負荷装置の負荷を設定するためのコントローラー。



VYCON VDC (Flywheel)

図 7.2 大電力供給試験のセットアップ。https://www.calnetix.com/sites/ default/files/CA_VYCON_VDC_BROCHURE_ENGLISH_%20WEB_6_15_16.pdf の図 を改変。擬似負荷のコントローラーで出力値を入力上限値よりも大きく設定すると、 UPS は大電力供給モードに移行する。この時フライホイールは放電され、出力先に大電 力が供給される。



図 7.3 大電力供給試験の様子。【上】フライホイールが示すエネルギー残量。4回の 220 kW 出力放電 + 4回の 420 kW 出力放電を行った。【中央】フライホイールの真空容 器の真空度。【下】それぞれのフライホイールから、UPS コントローラーへの出力(符合 反転で表記)。

7.2 試験内容

ここでは、7.1節の設定のもとで実施した試験内容について説明する。

エネルギーコンテナ二号機*⁴を用いて、放電テストを行った。負荷の値は、電源システム の出力値が次のようになるように設定した。

- 45 kW 出力、240 sec 放電
- 50 kW 出力、120 sec 放電
- 70 kW 出力、40 sec 放電
- 90 kW 出力、40 sec 放電
- 120 kW 出力、20 sec 放電
- 170 kW 出力、20 sec 放電
- 220 kW 出力、10 sec 放電
- 270 kW 出力、10 sec 放電
- 320 kW 出力、10 sec 放電
- 370 kW 出力、10 sec 放電
- 420 kW 出力、10 sec 放電

試験日*5一日あたり上記テストをそれぞれ4回行った。図7.3は試験ログの一部分であり、 図7.4は放電時におけるフライホイールのエネルギー残量に関する結果例である。

7.3 誤差の議論

続いて、取得したデータ点の時間情報およびエネルギー残量値に関する誤差についてこ の節でまとめる。

■エネルギー残量値誤差

エネルギー残量値は $\Delta_E = 1\%$ のビンで離散化されている。これを用いて y 軸エネル ギー残量の誤差を、

$$\Delta_y := \frac{\Delta_E}{2\sqrt{3}} \tag{7.1}$$

とする*6。

^{*4} エネルギーコンテナは計四つある。一つのエネルギーコンテナの中に電源システムが一つある。

^{*&}lt;sup>5</sup> 実施日:2018 年 8 月 6 日から 8 月 8 日。コンテナ三号機は 7 月 31 日から 8 月 1 日。四号機は 9 月 25 日。 *⁶ あるビン内 $[\tilde{x}, \tilde{x} + \Delta)$ の値 x がとる一様確率密度関数 $P(x) := 1/\Delta$ を用いて、標準偏差は $\sigma = \sqrt{\int_{\tilde{x}}^{\tilde{x}+\Delta} P(x)x^2 dx - [\int_{\tilde{x}}^{\tilde{x}+\Delta} P(x)x dx]^2} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}$ 。これを誤差と定義する。



図 7.4 大電力供給試験結果の例。[横軸] 時間。[縦軸] フライホイールごとのエネ ルギー残量。(a) 出力 45 kW での例。(b)50 kW。(c)70 kW。(d)90 kW。(e)120 kW。 (f)170 kW。(g)220 kW。(h)270 kW。(i)320 kW。(j)370 kW。(k)420 kW。



図 7.5 試験結果の誤差を示した図。出力 420 kW での例。[横軸] 時間。[縦軸] フライ ホイールごとのエネルギー残量。また、一次関数でのフィッティングの結果を右上に 示す。

■時間誤差

時間情報については、二つの要素が誤差を生じさせる。一つはモニタリングシステムが フライホイールの読み取りを有限時間 Δ_{mon} ごとに実行するためで、この誤差を $\Delta_{mon}/2$ とする。もう一つは、フライホイールが実際の残量を更新するのに有限の時間 Δ_{update} か かるためで、この影響で図 7.5 が示すように時間情報は Δ_{update} のビンで離散化される。 よってこの誤差を $\Delta_{update}/2\sqrt{3}$ とする。二つの誤差を合わせ、時間情報の誤差は

$$\Delta_x := \sqrt{\left[\frac{\Delta_{\text{mon}}}{2}\right]^2 + \left[\frac{\Delta_{\text{update}}}{2\sqrt{3}}\right]^2} \tag{7.2}$$

となる。



図 7.6 エネルギー減少スロープおよびフライホイール一つあたりの消費電力。横軸は電 源システムの出力値。【左】フライホイール 1。【右】フライホイール 2。【上】フィッティ ングで求めたエネルギー減少スロープ。【下】スロープの値から求めた、フライホイール 一つあたりの消費電力。すべてのプロットを測定日ごとに色分けして表記している。

7.4 フライホイール消費電力の導出

7.4 フライホイール消費電力の導出

図 7.4 や図 7.5 に書かれている「par 1」という値は、エネルギー残量の単位時間当たり 変化量*7である。これは放電時のデータ点およびその誤差*⁸を用いて、最小二乗法によって 算出した*⁹。

そして図 7.6 が示しているのは、その解析結果をすべてプロットしたものである*¹⁰。横 軸は擬似負荷で設定した出力値である。図 7.6(下)はフライホイールが 4.2 MJ のエネル ギーを蓄えられるという情報を用いて、スロープの値を変換し、フライホイールで消費され た電力を算出している。この結果から、

- 実施日による結果の偏りは誤差の範囲で確認できない。
- 出力値とフライホイールの消費電力が一次関数の対応を持つ。

ことが確認できた。したがって 7.5 節からはこれら三日分のデータを合わせて解析を行う。

^{*&}lt;sup>7</sup> 単位は %/sec。

^{*8 7.3} 節で定義したもの。

^{*9} フィッティング関数は一次関数を仮定している。

^{*&}lt;sup>10</sup> 8 月 8 日は 50 kW、170 kW、420 kW のみ実施した。270 kW、370 kW を実施したのは 8 月 6 日のみ。

7.5 電源システム出力電力とフライホイール合計消費電力の 関係

図 7.7 (a) は 7.4 節で得たフライホイール 1 とフライホイール 2 の消費電力値(全デー タ)である*¹¹。同じ出力電力条件で複数回の試験を実施しているので、図中からもデータ 点が縦方向に複数存在していることがわかる。この節では、

- 両フライホイール消費電力の合計値を試験ごとに出す。
- その値を同じ出力電力条件ごとにまとめ、重みづけ平均を取る。

という二つの手順を経ることで、出力電力条件に対応する、フライホイール消費電力の合計 値とその誤差値を求める。そして最後にその値を用いて一次関数フィッティングを行う。

以下、順に式で説明する。

■データごとのフライホイール消費電力合計値

両フライホイールの合計値 P_{i,i} および誤差は

$$P_{i,j} := P_{i,j}^{[\text{FW1}]} + P_{i,j}^{[\text{FW2}]}$$
(7.3)

$$\sigma_{i,j} := \sqrt{\sigma_{i,j}^{2}[\mathrm{FW1}] + \sigma_{i,j}^{2}[\mathrm{FW2}]}$$
(7.4)

である。ここで *i* は擬似負荷出力値 (*i*kW)、*j* はラベルである。

■出力ごとのフライホイール消費電力合計値

出力ごとの両フライホイールの合計値 P_i および誤差は、重みを

$$w_{i,j} := \frac{1}{\sigma_{i,j}^2} \tag{7.5}$$

と定義して、以下のように表現する。

$$P_{ikW} := \frac{\sum_{j} w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{j} w_{i,j}}$$

$$(7.6)$$

$$\sigma_{ikW} \coloneqq \frac{1}{\sqrt{\sum_j w_{i,j}}} \tag{7.7}$$

^{*&}lt;sup>11</sup> 図 7.7 (a) を詳細に観察すると、200 kW 未満と 200 kW 以上で、両フライホイール出力の差に違う傾向が 見てとれる。UPS コントローラの中には 200 kW の出力装置が計三つ入っている。出力差の原因は、この 出力装置を用いる数によって、出力挙動が異なるからだと考えている。しかしこの節で説明するように、二 つのフライホイールの出力合計値(図 7.7 (b))に関しては、200 kW 未満と 200 kW 以上で異なる挙動は 見られない。



図 7.7 フライホイール合計の消費電力(コンテナ二号機)。横軸は電源システムの出力 値。【上】出力条件ごとのフライホイール一つあたりの消費電力。全データをプロットし ている。【下】フライホイール合計の消費電力。また、フィッティングした結果を赤色の 線と左上の数値で示す。

 \sum_{j} は同じ擬似負荷出力のデータを足しあげている。この結果を図 7.7 (b) に (i, P_{ikW}) として誤差つきプロットする。

■フィッティング

プロット点とその誤差を用いて一次関数 $y = p_1 x + p_0$ でフィッティングした結果を 図 7.7 (b) に示す。また、図 7.8 はコンテナニ、三、四号機の結果を併記している。三号機、 四号機も同様の実験を行ったが、その結果は Appendix A で述べる。二号機三号機の電源 システム出力電力とフライホイール合計消費電力の関係は、有意水準 10% で $y = p_1 x + p_0$ から有意にずれているとは言えない。

以降二号機の結果をこの章の結果としてまとめる*12。フライホイールの合計消費電力

^{*12} 三号機はテスト後、業者が設定を変えたため結果が変わる可能性がある。



図 7.8 フライホイール合計の消費電力(全コンテナ)。横軸は電源システムの出力値。 コンテナごとに色分けしていることに注意。二号機、三号機のフィッティング結果を左 上に示す。四号機は異なる出力条件での測定ができなかったためフィッティング結果は 示していないことに注意。

P_{tot} は電源システム出力電力 P_{out} を用いて

$$P_{\rm tot} = 1.011(3) \times P_{\rm out} - 38.0(4) \,\rm kW$$
 (7.8)

と求まる。

また、この結果から

$$P_{\rm out} = 37.6(4)\,\rm kW \tag{7.9}$$

のとき、フライホイールの充電と放電が釣り合う $(P_{tot} = 0)_{o}$

7.6 まとめ

- 大電力供給機能を確認するために、LST による高速回転を想定した試験を実施した。
- 高速回転の状況を再現するために、擬似負荷を電源システムの出力側に接続した。
- 様々な出力値を設定し、その時のフライホイールの放電の様子をモニタリングした。

- 大電力供給機能が正常に作動することを確認した。
- フライホイールの合計消費電力 P_{tot} は、LST 用の出力 P_{out} を用いて、
 P_{tot} = 1.011(3) × P_{out} 38.0(4) kW

と表現できる。

• P_{out} = 37.6(4) kW のとき、フライホイールの充電と放電が釣り合う。
第8章

【結果 d】 高速回転時に予見される 望遠鏡装置群の振る舞い

この章では、第7章の結果を受けて、望遠鏡および電源システムを構成するそれぞれの 装置が、高速回転中にどのような挙動を示すのかということについて、解析した結果を説明 する。

8.1 「高速回転」の定義

第6章では方位角高速回転の定義を、

- 回転最大角速度 ω_{max}: 0.23 rad/s
- •回転最大角加速度 $\dot{\omega}_{max}$: 0.047 rad/s²

としていた。(仰角に関しては上記値を $\frac{65}{180}$ 倍していた。)この章では、その定義を「任意の」 最大角加速度および最大角速度に拡張したときの、各装置の挙動を論ずる。「任意の」 と述べたが、最大角加速度 $\dot{\omega}_{max}$ および最大角速度にはそれぞれ制限がある。

まずこの章の議論では、「任意の」 最大角加速度および最大角速度での、電源システムに 要求する最大電力 *P*_{out} などを理解することが目的なので、前提として、

- 方位角回転角度 $\Delta \varphi = 180^{\circ}$
- 仰角回転角度 $\Delta \theta = 65^{\circ}$

を仮定する。(また、この章でも、第6章と同様に、仰角の $\dot{\omega}_{max}$ と $\dot{\omega}_{max}$ については、方 位角の $\frac{65}{180}$ 倍の値を採用する。)



第8章

【結果 d】高速回転時に予見される望遠鏡装置群の振る舞い

図 8.1 各条件ごとの LST の回転挙動を示した図。(A) 第6 章と同じ条件。(B) 最大角 加速度が最大角速度に対して十分大きい場合の例。(C) 最大角速度が最大角加速度に対 して十分大きい場合の例。(D) 最大角速度と最大角加速度がどちらも十分大きい場合の 例。上から順に、回転角加速度、回転角速度、回転角度。仰角方向の回転角加速度、回転 角速度、回転角度については、図中の値の <u>65</u> 倍であることに注意。

図 8.1(A) は 6.2 節の回転挙動図を再掲したものであるが、 $\dot{\omega}_{max}$ が ω_{max} に対して十分 大きくなると、図 8.1(B) が示すようにあるところで $\dot{\omega}_{max}$ に達することができなくなる。 このとき $\dot{\omega}_{max}$ は角加速度の上限値に達している。

一方、図 8.1(C) のように ω_{\max} が $\dot{\omega}_{\max}$ に対して十分大きくなると、 ω_{\max} に達すること ができなくなる。

また ω_{max} と $\dot{\omega}_{\text{max}}$ がどちらも十分大きくなると、図 8.1(D) のように角加速度と角速度 両方の上限値に達する。

図 8.2 は $(x, y) = (\dot{\omega}_{\max}, \omega_{\max})$ としたときの角加速度と角速度の制限域を示しており、 青い領域のみが実現可能な $\dot{\omega}_{\max}$ と ω_{\max} である。以降、青い領域のみの計算結果を示す。

8.2 望遠鏡のポインティング完了時間

8.1 節で述べたように、LST のポインティング完了時間は最大角加速度と最大角速度に よって一意に決定される。 $(x, y) = (\dot{\omega}_{\max}, \omega_{\max})$ として LST のポインティング完了時間を 図 8.3 に示す。ここで x 軸と y 軸の値を第 6 章で定義した値で規格化していることおよび z 軸の定義を

96



図 8.2 最大角速度と最大角加速度の制限域の図。青い領域のみが回転挙動として実現可能である。仰角方向の $\dot{\omega}_{max}$ と $\dot{\omega}_{max}$ については、図中の値の $\frac{65}{180}$ 倍であることに注意。

としていることに注意*1。

8.3 UPS

ここでは、望遠鏡が電源システムに要求する電力 P_{out} および、総エネルギー量についての結果を示す。

■出力電力

図 8.4 が示しているのは、8.1 節で定義した $\dot{\omega}_{max}, \omega_{max}$ のもと、第7章と同様の計算 をしたときに想定される最大電力 P_{out} である。高速回転中に他装置が必要とする電力は 45 kW *²、一方通常運転時に見積もられる電力は 22 kW と述べた*³。したがってこの章で

^{*1} つまり z 軸の値が大きいほど早く回転する。

^{*2 6.8} 節参照。

^{*3 5.3} 節参照。



図 8.3 LST のポインティング完了時間。z 軸の値の領域ごとに色分けした図。x 軸は 回転での最大角加速度。y 軸は回転での最大角速度。ポインティング完了時間が 20 秒と なるところを黒線で表示している。ポインティング完了時間は z 軸の "分母" に相当す るため、早く回転するほど z 軸の値が大きくなるということに注意

は式 (6.15) を

$$P_{\rm out} := \begin{cases} P_{\rm out_rot} + 45 \,\rm kW & (\omega_{\rm max} \ge 0.23 \,\rm rad/s) \\ P_{\rm out_rot} + (45 - 22) \frac{\omega_{\rm max}}{0.23 \,\rm rad/s} + 22 \,\rm kW & (\omega_{\rm max} < 0.23 \,\rm rad/s) \end{cases}$$
(8.2)

と改変した。また z 軸の定義を

$$P_{\rm out} \,/\, 525 \,\rm kW$$
 (8.3)

としていることにも注意。UPS は 600 kVA の出力が出せるが、2250 m では Derating Factor = 0.875 の影響で、

$$600 \times 0.875 = 525 \,\mathrm{kVA}$$
 (8.4)

の出力制限がかかる。また、式 (8.3)の単位は kVA なので実際に電源システムが供給できる出力上限(単位は kW)は力率 $\cos \phi^{*4}$ を用いて、

$$525\cos\phi \quad [kW] \tag{8.5}$$

^{*4} 英語では Power Factor と表現する。実際の力率は LST を用いた高速回転テストを行わないとわからない。



図 8.4 LST が電源システムに要求する最大電力。z軸の値の領域ごとに色分けした図。 力率 $\cos \phi = 1$ とした時の出力上限値である 525 kW で規格化されていることに注意。 黒線は z = 1.0 を示す。例えば力率が $\cos \phi = 0.95$ なら、電源システムが供給可能な回 転挙動は、z = 0.95 より左下の領域のみである。

となる。つまり図 8.4 の *z* 軸の値のうち力率の値を超える領域は UPS の出力上限を超えて いるため運転が認められない。

■出力総エネルギー

図 8.5 は UPS が高速回転中に出力したエネルギーを示す。重要なのは、出力エネルギー のうちフライホイールが供給した分である。8.4 節にその結果を示す。

8.4 フライホイール

次に、高速回転終了後のフライホイールエネルギー残量についての結果を説明する。 7.5 節の結果からエネルギー残量の変化率 *P*tot は出力電力 *P*out と式 (7.8)の関係に従うようにする。図 8.6 は高速回転前にエネルギー残量が 100% だった二つのフライホイールの、回転後エネルギー残量を示している。



図 8.5 LST が電源システムに要求する、高速回転中の電気エネルギー。z 軸の値の領 域ごとに色分けした図。

8.5 減速用抵抗装置

減速用抵抗装置とは、4.6 節で説明したように、LST が減速回転する時に発生する回 生電力を消費するための抵抗器群*⁵である*⁶。抵抗器には、一つあたり、許容最大電力 $P_{\text{reg_lim}} = 100 \,\text{kW}$ と許容最大エネルギー $E_{\text{reg_lim}} = 200 \,\text{kJ}$ が定められており、

- それら上限値を回生電力および回生エネルギーが上回らないこと。
- 回生エネルギー消費後、冷却のために一定時間待つこと。

の二点が必要である。これらについて以下で議論する。

■回生電力

図 8.7 は 6.9 節と同様の計算に従い算出した方位角および仰角の回転で生じる最大回生

^{*&}lt;sup>5</sup> 英語では Braking Register と表現する。

^{*6} エネルギー流れの詳細は図 4.2 参照。



図 8.6 高速回転後のフライホイールのエネルギー残量。z 軸の値の領域ごとに色分けした図。高速回転前のエネルギー残量は 100% としている。



図 8.7 減速時の最大回生電力。(a) 【方位角】z軸の値の領域ごとに色分けした図。(b) 【仰角】z軸の値の領域ごとに色分けした図。それぞれ上限値で規格化されていることに 注意。黒線はz = 1.0を示す。



図 8.8 減速時の回生エネルギー。(a) 【方位角】 z 軸の値の領域ごとに色分けした図。 (b) 【仰角】 z 軸の値の領域ごとに色分けした図。それぞれ上限値で規格化されているこ とに注意。黒線は z = 1.0 を示す。

電力 P_{reg} である。z 軸の値は、回生電力上限値で規格化していることに注意*7。方位角の 結果を見てみると、 P_{reg} が上限値に達している (z > 1) 領域が存在していることがわかる。 この領域の運転は認められない。

■回生エネルギー

図 8.8 の z 軸が示すのは、回生エネルギー上限値で規格化した、高速回転時の回生エネ ルギー E_{reg} である。方位角の結果を見てみると、 E_{reg} が上限値に達している (z > 1)領 域がある。この領域の運転は認められない。

■回生エネルギー消費後の待ち時間

回生エネルギーを消費した抵抗器は、そのエネルギー量に比例した温度上昇を引き起こ すため、一定時間冷却のために待つ必要がある。ここでは回生エネルギー消費後の待ち時 間について導出する。4.6 節で述べたように、抵抗器のカタログには、待ち時間が

抵抗器一つあたり E_{reg} = 100 kJ 消費後の待ち時間は 68 sec

・ 抵抗器一つあたり $E_{\rm reg} = 200 \, \text{kJ}$ 消費後の待ち時間は $460 \, \text{sec}$

と定められている。この情報を用いて温度変化微分方程式

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{\tau} (T - T_{\mathrm{outside}}) \tag{8.6}$$

$$\longrightarrow T(t) - T_{\text{outside}} = (T_{\text{upper_limit}} - T_{\text{outside}}) \times \exp(-t/\tau)$$
 (8.7)

^{*7 4.6} 節で述べたように、抵抗器は方位角に 4 つ、仰角に 2 つ配置されているため上限値はそれぞれ 400 kW、 200 kW である。



図 8.9 回生エネルギー消費後の抵抗装置挙動。100 kW と 200 kW 両方の場合を描いている。

の τ を求めることで任意の E_{reg} での待ち時間を算出する。

待ち時間の条件により、 $E_{\text{reg}} = 100 \text{ kJ}$ 、 $E_{\text{reg}} = 200 \text{ kJ}$ 消費後の挙動は図 8.9 のようになると考えられる。ここで上の赤線は温度上限値 $T_{\text{upper_limit}}$ 、下の青線は外気温 T_{outside} である。回生エネルギーによる温度上昇の時間は待ち時間に比べて十分短いとしている。

さらに図 8.9 が示すように待ち時間が経つごとに、再び回生エネルギーの消費を実施する状況を考える。温度上昇 ΔT と回生エネルギー $E_{\rm reg}$ は

$$\Delta T \propto E_{\rm reg}$$
 (8.8)

であるので、 $E_{\rm reg} = 100 \, {\rm kJ}$ の温度上昇 $\Delta T_{100 \, {\rm kJ}}$ と $E_{\rm reg} = 200 \, {\rm kJ}$ の温度上昇 $\Delta T_{200 \, {\rm kJ}}$ の 関係は

$$\Delta T_{200 \,\mathrm{kJ}} = 2 \times \Delta T_{100 \,\mathrm{kJ}} \tag{8.9}$$

となる。一方温度下降の振る舞いから

$$\begin{cases} \Delta T_{200 \,\text{kJ}} = T(0 \,\text{s}) - T(460 \,\text{s}) \\ \Delta T_{100 \,\text{kJ}} = T(0 \,\text{s}) - T(68 \,\text{s}) \end{cases}$$
(8.10)

である。式 (8.7), (8.9), (8.10) より

$$\tau = 99.5 \,\mathrm{sec} \tag{8.11}$$



図 8.10 回生エネルギー消費後に必要な待ち時間。再び回生エネルギーを消費するため に必要とされる時間を示している。

と求まる。さらに

$$\Delta T_{i\,\mathrm{kJ}} = T(0\,\mathrm{s}) - T(t) \tag{8.12}$$

とおくと、これと式 (8.7), (8.8), (8.10) より

$$t = -\tau \ln \left\{ \left[\exp(-460\,\mathrm{s}/\tau) - \exp(-68\,\mathrm{s}/\tau) \right] \times \frac{i}{100} + \left[2\exp(-68\,\mathrm{s}/\tau) - \exp(-460\,\mathrm{s}/\tau) \right] \right\}$$
(8.13)

と導出される。図 8.10 は式 (8.11) で求めた τ を代入して

- 抵抗器ひとつが消費する回生エネルギー ikJ:x 軸
- 待ち時間 *t*: *y* 軸

とした結果である。

8.6 望遠鏡モーターにかかる負荷

続いて、望遠鏡を動かすモーターの振る舞いを議論する。



図 8.11 LST のモーターにかかる最大電力。(a) 【方位角】 z 軸の値の領域ごとに色分け した図。(b) 【仰角】 z 軸の値の領域ごとに色分けした図。それぞれ定格電力で規格化さ れていることに注意。黒線は z = 1.0 を示す。

■モーターの電力負荷

図 8.11 は 6.5 節と同様の方法で求めた、方位角および仰角の望遠鏡高速回転に必要な仕 事率 P_{LST} の最大値を、"継続的に"モーターが出せる電力であるモーター定格電力*⁸、す なわち

で規格化したものである。モーターひとつの定格電力および、次に述べる、モーターひとつ の定格トルクについては 4.6 節を参照。

■モーターのトルク負荷

続いて 6.6 節と同様の計算で算出した望遠鏡にかかる最大トルク T を、定格トルク、すなわち

[モーターひとつの定格トルク] × [モーター数] × [モーターと望遠鏡間のギア比*¹⁰] (8.15) で規格化して図 8.12 に示す。

^{*&}lt;sup>8</sup> LST 高速回転中に最大電力および最大トルクがかかる時間は "瞬間的" なので定格の値を超えても問題ない 点に注意。一般に瞬間的には定格の 3-4 倍の出力が可能とされる。

^{*9 4.6} 節で述べたように、モーターは方位角に 4 つ、仰角に 2 つ配置されている。

^{*&}lt;sup>10</sup> 4.6 節を参照。方位角:18(Reducer) × 72(Rack&Pinion)。仰角:85.5(Reducer) × 28(Rack&Pinion)。



図 8.12 LST のモーターにかかる最大トルク。(a) 【方位角】 z 軸の値の領域ごとに色分 けした図。(b) 【仰角】 z 軸の値の領域ごとに色分けした図。それぞれ定格トルクで規格 化されていることに注意。黒線は z = 1.0 を示す。

8.7 回転中に望遠鏡にかかる力

最後に、LST が高速回転する際に自身にかかる力について言及しておく。角加速度と角 速度に依存する力はそれぞれ慣性力*¹¹と遠心力であり、どちらも回転軸からの距離 r に比 例する。したがって、ここでは r 最大のところに位置するカメラ構造体(図 8.13(a))への 力についてまとめる。カメラ構造体の軸を(図 8.13(b))と定義する。構造体へかかる力は

- 重力
- 慣性力
- 遠心力
- 風圧による力

を想定する*¹²。三つの軸の正負それぞれに関して、慣性力と遠心力による力が最大となる 条件は次の時である*¹³。

- x_{\max} : $\theta = 65^{\circ}, \, \omega = \omega_{\max} \, \mathcal{O}$ とき
- y_{\max} : $\theta = 0^{\circ}, \, \dot{\omega} = \dot{\omega}_{\max} \, \mathcal{O}$ とき
- y_{\min} : $\theta = 54.7^{\circ}, \, \omega = \omega_{\max}, \, \dot{\omega} = \dot{\omega}_{\max} \, \mathcal{O}$ とき

^{*&}lt;sup>11</sup> 半径 r 不変、二次元極座標の固定系を想定しているので θ 方向にはたらく慣性力。

^{*&}lt;sup>12</sup> 用いたパラメータは第6章と同じ。加えてカメラの重さをm = 2.5 ton、カメラと軸の距離をr = 28 m、 カメラの表面積を $S_{xy} = 10 \text{ m}^2, S_{yz} = S_{zx} = 3 \text{ m}^2$ とした。

 $^{*^{13}}$ 対称性より $F_{\min} = -F_{\max}$ である。



図 8.13 変数および軸の定義。(a) $r \ge \theta$ の定義。カメラ構造体は矢印のところに位置 する。(b) カメラ構造体の x 軸、y 軸および z 軸の定義。z 軸正方向は LST 外側方向で ある。

	重力	慣性力	遠心力	風圧による力
x 軸正方向	0	$0.30 imes \left(\frac{\dot{\omega}_{\max}}{0.047 \mathrm{rad/s^2}} ight)$	0	0.050
x 軸負方向	0	$-0.30 \times \left(\frac{\dot{\omega}_{\text{max}}}{0.047 \text{rad/s}^2}\right)$	0	-0.050
y 軸正方向	0	$0.12 \times \left(\frac{\dot{\omega}_{\text{max}}}{0.047 \text{rad/s}^2}\right)$	0	0.050
y 軸負方向	-2.0	$-0.12 \times \left(\frac{\dot{\omega}_{\max}}{0.047 \mathrm{rad/s^2}}\right)$	$-0.15 imes \left[rac{\omega_{ m max}}{0.23 m rad/s} ight]^2$	-0.017
z 軸正方向	-1.3	0	$0.30 \times \left[\frac{\omega_{\max}}{0.23 \mathrm{rad/s}}\right]^2$	0.013
z 軸負方向	-2.5	0	0	0

表 8.1 カメラ構造体にかかる力(単位 ton 重)

表 8.2 カメラ構造体に加わる加速度(重力定数で規格化)

	重力	慣性力	遠心力	風圧による力
x 軸正方向	0	$0.12 imes \left(rac{\dot{\omega}_{ m max}}{0.047 m rad/s^2} ight)$	0	0.020
x 軸負方向	0	$-0.12 imes \left(\frac{\dot{\omega}_{\max}}{0.047 \mathrm{rad/s^2}} ight)$	0	-0.020
y 軸正方向	0	$0.048 imes \left(\frac{\dot{\omega}_{\max}}{0.047 \mathrm{rad/s^2}} \right)$	0	0.020
y 軸負方向	-0.80	$-0.048 imes \left(\frac{\dot{\omega}_{\max}}{0.047 \mathrm{rad/s^2}} ight)$	$-0.060 imes \left[rac{\omega_{ m max}}{0.23 m rad/s} ight]^2$	-0.0068
z 軸正方向	-0.52	0	$0.12 \times \left[\frac{\omega_{\max}}{0.23 \text{ rad/s}}\right]^2$	0.052
z 軸負方向	-1	0	0	0

- ・ z_{\max} : $\theta = 60^{\circ}, \, \omega = \omega_{\max} \, \mathcal{O}$ とき
- ・ z_{\min} : $\theta = 0^{\circ}, \, \omega = 0$ のとぎ

上記の条件でのそれぞれに働く力を単位 ton 重 で示した結果が表 8.1 である。

表 8.2 には、カメラ構造体に働く重力 $mg = 2.5 \text{ ton} \equiv で規格化した結果を示している。$ これらの結果から、

- 高速回転の慣性力は x 軸正方向(もしくは負方向)への力が支配的である。
- 高速回転の遠心力は z 軸正方向への力が支配的である。
- 慣性力も遠心力も、カメラ構造体にはたらく重力に比べると、たかだか1割程度で ある。

ということが言える。

8.8 まとめ

- ・望遠鏡および電源システムを構成するそれぞれの装置が、高速回転中にどう振る舞うか解析した。
- 様々な最高角速度および最大角加速度での高速回転の状況を設定した。
- 最高角速度および最大角加速度によって、LST のポインティング完了時間が決まる。
- UPS の出力電力、出力総エネルギーを求めた。
- フライホイールのエネルギー残量を求めた。
- 回生電力、回生エネルギーおよび、回生エネルギー消費後の待ち時間を求めた。
- モーターの電力負荷およびトルク負荷を求めた。
- カメラ構造体に回転中にかかる、慣性力と遠心力を求めた。

第9章

【結果 e】

高速回転を実行するための条件確定

この章では、第6章の計算と第7-8章で得られた知見から、実観測の際に高速回転を行 うための条件について議論する。



図 9.1 UPS 出力上限および回生電力と回生エネルギーの上限図。図 8.3 の上に、UPS および抵抗装置の制限線を描いている。領域の左下が実現可能である。



図 9.2 UPS 出力上限およびモーター定格電力とモーター定格トルクの図。図 9.1 の領 域を拡大している。モーターの線は定格の値であって、上限値ではないことに注意。仰 角方向の $\dot{\omega}_{max}$ と $\dot{\omega}_{max}$ については、第8章で議論したように、図中の値の $\frac{65}{180}$ 倍であ ることに注意。

9.1 最大角加速度と最大角速度の確定

この節では第8章の結果を用いて、全装置が安全に機能する範囲内での最大角加速度と 最大角速度を、高速回転を実行するための条件として確定する。

図 9.1 は 8.5 節で述べた、方位角の抵抗器に流れる最大回生電力 $P_{\text{reg_lim}}$ と回生エネル ギー $E_{\text{reg_lim}}$ の制限、および 8.3 節で述べた UPS の出力上限について書いた図である*¹。 UPS の出力上限値は力率の値によるが、ここでは 0.9 または 0.95 を仮定している*²。xy 軸は同様に $(x, y) = (\dot{\omega}_{\text{max}}, \omega_{\text{max}})$ で、z 軸の値は 8.2 節のポインティング完了時間である。 この図から、($\dot{\omega}_{\text{max}}$ と ω_{max})の制限は UPS が支配的だとわかる。

また、図 9.2 は非制限領域を拡大し、モーターの定格電力および定格トルクの線を書き足

^{*1} 図 9.1 と図 9.2 は、線の右上領域が制限区域という意味である。

^{*2 8.3} 節で述べたように実際の力率は LST を用いた高速回転テストを行わないとわからない。

している。瞬間的には定格値の 3-4 倍の出力が可能*³であるから、この図からも UPS が制限として最も厳しいといえる。

これらの結果から、最大回転角加速度と最大回転角速度を

- $\dot{\omega}_{\rm max} = 0.047 \, {\rm rad/s^2}$
- $\omega_{\rm max} = 0.23 \, \rm rad/s$
- ・
 仰角に関しては上記値の
 <u>65</u>

 ・
 倍の値

と確定する。理由を次に表記する。

- 6.8 節でもとめた想定される最大電力 P_{out} を考えても、UPS 出力の上限にはあと 50% 程度余裕があり安全と判断できるから。
- 8.7節で議論した望遠鏡にかかる慣性力や遠心力も重力に比べ1割程度で済むから。
- UPS 上限の境界線付近に $\dot{\omega}_{max}, \omega_{max}$ を設定したとしても、回転にかかる時間は 3 秒程度しか改善しないから。

したがって本電源システムを用いて安全に 20 秒の高速回転を実施できることを示した。確 定した ώ_{max}, ω_{max} を超えた高速回転は推奨しない。

9.2 【高速回転禁止】フライホイールエネルギー不足時

4.4 節で述べたように、フライホイールのエネルギー残量が一度ゼロになってしまうと、 手動でフライホイールのブレーカーを戻さない限り再充電が行えなくなる。したがって、エ ネルギー残量がゼロになってしまうことは、極力避けなければならない。

8.4 節の結果*⁴から高速回転によってフライホイールのエネルギー残量は~15% 減る ことが示された。(図 9.3 は高速回転中のエネルギー残量変化に関する実際の計算結果で ある。)

この結果から、安全のために factor ~ 2 程度の余裕を考えて、エネルギー残量が 40% を 下回っている場合、高速回転を禁止するようにする*⁵。

^{*&}lt;sup>3</sup> 8.6 節参照。

^{*&}lt;sup>4</sup> 8.6 $\mathcal{O}(x, y) = (1.0, 1.0)$ を参照。

^{*&}lt;sup>5</sup> そのような状況は、3,4 回連続で GRB ポインティングが行われるか、無停電電源モード状態から回復した 直後にアラートがやってくる場合のみ起こりうると考えられる。



図 9.3 LST 高速回転中に予想されるエネルギー残量の変化。上から順に、電源システムが供給すべき総仕事率、電源システムが供給する電気エネルギー、エネルギー残量の 変化。

9.3 【緊急停止】回転中の想定外な挙動

高速回転中に「想定外な挙動」をシステムが検知した時には、直ちに高速回転を中止し、 可能な限り早く緊急停止するべきである。「想定外な挙動」だと考えている状況は、二つ ある。

- UPS の最大供給電力を超過しそうな振る舞いが予期されたとき。
- フライホイールのエネルギー残量減少ペースが想定外に早く、残量ゼロになる危険
 性が検知されたとき。

■UPS の最大供給電力を超える可能性

UPS の最大供給電力を超える可能性を検知した時には緊急停止をするべきである。UPS コントローラーが読み取る出力電力は ~1 秒ごとにしか情報更新されない一方で、ドライ ブシステムはトルクや電力を ~10 ミリ秒ごとに読み取ることができるので、この検知プロ グラムは、電源システムのモニタリングシステム上ではなく、ドライブシステム上に実装す るべきである。

■フライホイールエネルギー残量に関する緊急停止

フライホイールが想定外に放電している際には緊急停止をするべきである。9.2 節で 40% を高速回転をする閾値と決めたため、高速回転を実行してもエネルギー残量は~25% 程度までしか減らないと想定される。よって想定外のエネルギー残量を 20% と決める。高 速回転中に電源システムのモニタリングシステムがエネルギー残量 20% 以下を検知したら 速やかにドライブシステムに緊急停止信号を送る*6。

9.4 【高速回転禁止】無停電電源モード状態

停電が起こり入力側からの電力が遮断されている無停電電源モード状態の間*7は、高速回転を行うべきではない。

高速回転に必要な~15%のエネルギーはフライホイールによって供給できうるが、無停 電電源モード状態は入力電力が遮断されており、フライホイールのエネルギーは減る一方 である。フライホイールのエネルギー残量が0%に達してしまう可能性がある以上、無停

^{*6} 二つのフライホイールは ~ 400 kW の放電をしていても 20% が 0% になるまでに ~ 4 秒程度かかる。モ ニタリングシステムが ~ 1 秒おきに情報を読むとしてもその間にドライブシステムに停止信号を送ること は可能である。

^{*7} 第5章のような状況。

電電源モード状態の間にアラートが来ても高速回転を行うことは禁止するべきである。

9.5 【高速回転禁止】非常用発電機モード状態かつ燃料不足時

ここでは 9.4 節で述べた無停電電源モードの後、常用電源から非常用発電機へスイッチ が切り替わって入力側の電力が確保された*⁸状況での、高速回転可能性を議論する。

非常用発電機は燃料がある限り、常用電源と変わらない程度の電力を供給できる*⁹。した がってこの場合は、非常用発電機の残燃料に適切な閾値を設定し、その値を上回っている時 には、高速回転を許可する。

しかし、閾値を下回った時には高速回転を禁止するべきである。

9.6 【高速回転制限】一方のフライホイール故障時

続いて、電源システムを構成する二つのフライホイールのうち片方が故障し、一方しか正 常に機能しない状況を想定した制限事項について述べる。

フライホイールは一つあたり最大で 300 kW の電力を放出できる。したがって、この場合 は UPS システムの制限が 525 cos ϕ kW *¹⁰からさらに厳しくなり、300 kW となる。図 8.4 をみると、出力 P_{out} を小さくするためには、最大回転角速度 ω_{max} を小さくすることが効 果的で、

$$\frac{\omega_{\text{max_one_FW}}}{0.23 \,\text{rad/s}} \simeq 0.5 \tag{9.1}$$

半分程度の角速度に制限するべきである*11。

9.7 【高速回転禁止】高速回転後の数十秒間

高速回転を終えた数十秒間は、再び高速回転を実施してはいけない。これは、8.5 節で述 べた減速用抵抗器の冷却のために一定時間待つ必要があるからである。

高速回転中の回生エネルギーは 6.9 節で求めたように、方位角の 384 kJ である*¹²。よって抵抗器ひとつが消費する回生エネルギーは

$$i \,\mathrm{kJ} = 384/4 = 96 \,\mathrm{kJ}$$
 (9.2)

^{*8} 常用電源や非常用発電機の回路図については、図 4.2 参照。

^{*9} 常用電力が 650 kVA に対して非常用発電機は 600 kVA。

^{*10 8.3} 節参照。

^{*11} 高速回転の制限を行った場合でも、図 8.3 より、30-40 秒でのポインティングは可能である。

^{*12} 仰角を述べない理由は方位角の回生エネルギーが支配的だからである。

である。これを 8.5 節の式 (8.13) に代入することで待ち時間は

$$t = 64.2 \sec \tag{9.3}$$

と算出される。

したがって高速回転を終えた後、70秒程度は高速回転を行うことを禁止する。

9.8 【推奨】観測開始前の高速試運転

ここからは、禁止事項や制限事項とまでは言えないが、重要だと考えられることについて 記載する。

観測を行う日は、機器セットアップの際に高速回転の試運転を行うことを推奨する。

これは特に 9.3 節で述べた緊急停止の可能性を減らすためである。測定する日によって 平均風速や、レール表面の状況が異なることが考えられるので想定外の挙動を事前に予期 する可能性が高まる。

また、高速回転の試験データを増やすことで、LST のモデルをさらに改良することもで きる。

9.9 【注意】温度に関すること

最後に、現地での実験中に、高温によって引き起こされた問題例を示し、注意点として、 ここにまとめる。

■温度と真空度の関係

図 9.4 はエネルギーコンテナ三号機の

- コンテナに設置した温度計の値
- フライホイール容器内の真空度

の値について時刻を揃えて表示したものである。図から温度と真空度には正の相関がある ことがわかる。

■充放電と真空度の関係

続いて図 9.5 が示すのはエネルギーコンテナ二号機の

- フライホイールエネルギー残量
- フライホイール容器内の真空度

などである。このログが示すように、8月3日に片方のフライホイールの真空度が 40 mTorr



図 9.4 温度と真空度の関係。(上)エネルギーコンテナの中に設置された温度計の値。 (下)フライホイールの真空容器が示す真空度。

まで達し、"Vaccum Yellow Signal"を示した*13。この原因は

 放電や充電時には安定時と比較してジュール熱が多く発生し、それによる温度上昇 が真空を悪化させている。

ということを考えている。

真空の悪化を避けるためには、フライホイールは常にエネルギー残量 100% で待機させ ておく方が良い。図 9.5 中の「8 月 7 日 9 時」や「8 月 8 日 9 時」の真空度が示すように、 エネルギー残量 100% のまま待機させた時の真空度は安定していることがわかる。

■温度と磁気軸受の関係

4.4 節で述べたように、フライホイールは磁気軸受*¹⁴を用いて、非接触で軸を制御し安 定化させている。図 9.6 はエネルギーコンテナ四号機の温湿度を表示している。この日は、 業者がエアコンの性能テストを行っており二台あるエアコンのうち一台しか稼働していな

^{*&}lt;sup>13</sup> フライホイールは 33 mTorr 以上になると "Vaccum Yellow Signal" を示す。装置寿命を考えるとこのよう な状況は極力避けるべきである。

^{*&}lt;sup>14</sup> 英語では Magnetic Bearing と表現する。





(B)

図 9.5 数日にわたる長時間のフライホイールが示す挙動。(A) フライホイール 1。(B) フライホイール 2。(上) フライホイールが示すエネルギー残量。(中央) フライホイール の真空容器の真空度。(下) UPS コントローラーからそれぞれのフライホイールへの入 力。8 月 7 日と 8 月 9 日にみられる真空度の上への飛びは、人為的な操作によるもので あって、議論とは関係ないことに注意。

かったため、温度が 43°C まで上昇している。温度が上昇する過程で

- 15:47 に片方のフライホイールで "Magnetic Bearing Status Warning"
- 16:55 にもう一方のフライホイールで "Magnetic Bearing Status Warning"

のアラートが表示された*15。このアラートは、高温によって引き起こされたものと考えて

^{*15} 温度を再び下げた後はアラートが消えた。



図 9.6 試験を実施したある日のエネルギーコンテナの温湿度。上から、温度、湿度であ る。この日はエアコンの性能テストを実施しており、人為的に温度を上げた状況を生み 出している点に注意。

いる。このようなアラートを起こさせないためには温度を常に監視し、35°C を超えたら警報を伝えるようにしておくことを推奨する*¹⁶。

9.10 まとめ

- 実観測の際に高速回転を行うための条件について議論した。
- $\dot{\omega}_{\text{max}} = 0.047 \text{ rad/s}^2$ と $\omega_{\text{max}} = 0.23 \text{ rad/s}$ (仰角に関してはその $\frac{65}{180}$ 倍)を超えた 高速回転は推奨しない。
- •フライホイールのエネルギー残量が、40%を下回っている時の高速回転を禁止する。
- フライホイールのエネルギー残量が、20%を下回った瞬間に緊急停止信号を送る。
- 入力側からの電力が遮断されている無停電電源モード状態での高速回転を禁止する。
- 非常用発電機モードかつ、燃料不足の時の高速回転を禁止する。

^{*&}lt;sup>16</sup> エアコンを一台のみ稼働させることは、普段の観測ではないはずで、そのような可能性はエアコンの故障時 に限られることを言及しておく。

- フライホイールが一方しか正常に機能しない状況では、最大回転角速度 ω_{max} を半分 に制限する。
- 高速回転を終えた後、70秒は高速回転を禁止する。
- 高温で装置からアラートが出ないよう、注意する。

第10章

【議論】

高速回転によるガンマ線バースト 即時放射の観測可能性

第3章と第4章でまとめたように、この研究は、CTA-LST に導入される高速回転のた めの電源システムの開発研究である。まず第6章で、高速回転の最大電力要求値を推定し た。第5章と第7章では装置の試験を行うことで挙動を理解し、要求された機能が実現可 能なことを説明した。得られた知見から、第8章と第9章で、全装置が正常な状態で高速 回転を行うための条件を確定した。

以上の結果を受けて、この章では、開発した高速回転電源システムによって第2章で述 べたガンマ線バーストの即時放射を実際にどの程度観測できるのかということを議論する。

10.1 章の流れ

- GRB ポインティング前の LST 測定角度に関する確率密度分布を導出する。
- GRB の到来角度に関する確率密度分布を導出する。
- ポインティング時の LST 回転角度に関する確率密度分布を算出する。
- GRB が発生してから LST がポインティングを終えるまでにかかる所要時間確率密 度分布を計算する。
- 実際の GRB 統計データ*1と結果を比較する。

^{*&}lt;sup>1</sup> ここではデータ中の「T₉₀」という値を比較に用いる。即時放射継続時間に相当する量だが、より詳細な定 義は 10.7 節参照。



図 10.1 GRB アラート受信前の方位角に関する確率密度分布。確率密度関数を黒色、その積分値を赤色で描いている。

10.2 【確率密度分布】通常運転時の望遠鏡観測角度分布

まずはじめに、LST が GRB アラートを受信する前の通常運転時に、どの方角を観測し ている確率がどの程度あるか、という情報について議論する。まず望遠鏡方位角について 導出し、次に天頂角*²を導出する。

10.2 節と 10.3 節では、方位角 φ の定義域を [0°, 360°]、天頂角 θ の定義域を [0°, 65°] と 決める。

■望遠鏡方位角の確率密度分布

望遠鏡の方位角については、南中時を狙って観測するようにしているため、北、南の頻度 が若干多い可能性があるが、ここでは、アラート受信前の方位角に関する LST 観測確率は 一様だと仮定する。すると、LST 通常運転時の方位角確率密度関数は次のように示される。

$$P_{\rm ini}(\varphi) := \frac{1}{360} \tag{10.1}$$

^{*&}lt;sup>2</sup> 英語では Zenith と表現する。



図 10.2 仰角に関する挙動。(a) 全立体角に関して確率一様と仮定した場合における、仰角の確率密度分布。(b)MAGIC 望遠鏡による観測日ごとの実際の天頂角分布(時間平均および標準偏差)。

これを示したものが図 10.1 である。

ここで確率密度関数 P(x) についての性質を記載しておく。変数 x が $[x_i, x_f]$ の領域をとる確率は、

Prob.
$$[x_{i}, x_{f}] = \int_{x_{i}}^{x_{f}} P(x) dx$$
 (10.2)

によって算出される。また、確率密度関数 P(x) は、

$$\int_{x_{\inf}}^{x_{\sup}} P(x) dx = 1 \quad (x_{\inf} : \mathbb{c} \mathring{s} \checkmark \mathbb{k} \times x_{\sup} : \mathbb{c} \mathring{s} \checkmark \mathbb{k} \times \mathbb{k})$$
(10.3)

を満たす。

■望遠鏡天頂角の確率密度分布

続いて天頂角の確率密度関数を定義する。まず、全立体角について一様(=C)かつ、方 位角に関して一様*³とした時の天頂角確率密度関数 P_{ini}(θ) は、

$$\operatorname{Prob.}[\mathrm{d}\Omega] = \int \mathrm{C}\,\mathrm{d}\Omega \tag{10.4}$$

$$= \iint \mathbf{C}\sin\theta \,\mathrm{d}\theta \,\mathrm{d}\varphi \tag{10.5}$$

$$= \int \tilde{P}_{ini}(\theta) \, \mathrm{d}\theta \, \int P_{ini}(\varphi) \, \mathrm{d}\varphi = \operatorname{Prob.}[\mathrm{d}\theta][\mathrm{d}\varphi] \tag{10.6}$$

$$\longrightarrow \tilde{P}_{ini}(\theta) \propto \sin \theta$$
 (:: Eq.(10.5, 10.6)) (10.7)

となる。 $\tilde{P}_{ini}(\theta)$ を示したものが図 10.2(a) である。

しかし、実際の観測状況を考えてみると、天頂角の動きが 0 度から 65 度に限られている LST が立体角に関して一様に観測しているとは考えにくく、天頂角観測分布は 0 度から 65 度の範囲内に局在していると考えることがより自然である。したがって $\tilde{P}_{ini}(\theta)$ を改良する ために MAGIC 望遠鏡*⁴のデータを用いる。

図 10.2(b) は、MAGIC 望遠鏡アップグレード (2012 年末) の後からこれまでに観測して きた、1547 夜のデータである。一つの点の (*x*, *y*) は、

- ある測定日の天頂角測定方向の時間平均
- その標準偏差

を表す。IACT は一日の観測中にそれぞれの天体を 30 分から 1 時間で観測しているため、 必ずしも次の議論は自明ではないが、今回の解析では、平均と分散を用いて、ある測定日の 天頂角の確率密度関数を ($\tilde{P}_{ini}(\theta) \propto \sin \theta$ ではなくて)、

$$P_i(\theta) \propto \left[\sin\theta \times N(\mu_i, \sigma_i^2)\right]$$
 (10.8)

と定義できると仮定する。ここで N(μ_i, σ_i^2) は Gaussian Function、 $\mu_i = [$ 天頂角平均]、 $\sigma_i = [$ 天頂角標準偏差] であり、規格化定数 C は P_i(θ) = C $[\sin \theta \times N(\mu_i, \sigma_i^2)]$ が式 (10.3) を満たすように決められる。図 10.3 は様々な μ_i 、 σ_i の条件での方位角確率密度関数の例 を示している。

図 10.4(a) は、この確率密度関数を全 1547 データ分プロットしたものである。測定日ご とに測定時間は多少異なるが、今回の解析では、1547 個のデータを全て重ね合せることに よって天頂角確率分布が定義できるとする。つまり、LST 通常運転時の天頂角確率密度関 数は次式で定義される。

$$P_{\rm ini}(\theta) :\propto \sum_{i=1}^{1547} P_i(\theta) = \sum_{i=1}^{1547} \left[\sin\theta \times N(\mu_i, \sigma_i^2)\right]$$
(10.9)

^{*4} MAGIC 望遠鏡は CTA 北サイトと同じラ・パルマ島にある一世代前の大気解像型チェレンコフ望遠鏡である。2.4 節参照。



図 10.3 様々な μ_i 、 σ_i の条件での方位角確率密度分布の例。z 軸の値が方位角の確率密 度関数の値に対応している。(a) 方位角の平均 10°、標準偏差 5° としたときの確率密度 分布。(b) 平均 20°、標準偏差 15°。(c) 平均 30°、標準偏差 15°。(d) 平均 40°、標準偏 差 15°。(e) 平均 50°、標準偏差 15°。(f) 平均 60°、標準偏差 10°。



【議論】高速回転によるガンマ線バースト即時放射の観測可能性

図 10.4 GRB アラート受信前の天頂角に関する確率密度分布。(a)MAGIC 望遠鏡の観 測時における、天頂角の確率密度分布。式 (10.8) で定義された、観測日ごとの天頂角に 関する確率密度関数。(b) 天頂角に関する確率密度関数。観測日ごとの確率密度関数を重 ね合わせることで、GRB アラート受信前の天頂角に関する確率密度分布と定義する。



図 10.5 GRB の到来分布。(a)GRB の到来分布。(b) 方位角に関するヒストグラム。

規格化定数は式 (10.3) を満たすように決められる(以降、規格化定数の議論は同様)。 $P_{ini}(\theta)$ をグラフにしたものが図 10.4(b) である。

10.3 【確率密度分布】GRB 到来角度分布

この節では、GRB 到来角度についての確率密度分布を求める。

ここでは MAGIC 望遠鏡が今までに受けた GRB アラート 104 例を用いる。各 GRB 例

第10章



図 10.6 GRB の到来天頂角ヒストグラム。(a) 天頂角に関するヒストグラム。(b) 天頂 角に関するヒストグラム (ただし sin *θ* で規格化している)。

の修正ユリウス暦*5、赤径*6、赤緯*7の情報から、ラ・パルマ島に対応する方位角と天頂角 を計算した。この結果を図 10.5 に示す。

■天頂角の確率密度分布

図 10.6(a) は GRB の天頂角ヒストグラムである。図 10.6(b) はそれを 1/sin θ で重み付 けしたものである。式 (10.7) より、もし GRB 天頂角が一様であれば、図 10.6(b) は横ばい の分布になる。

しかし、~100 例ほどの統計量から、一様かどうか判断することは簡単ではないので、こ こでは天頂角の確率密度関数 $P_{fin}(\theta)$ を図 10.7 のようなデルタ関数の重ね合わせと考えて 次式で定義する。

$$P_{fin}(\theta) := \frac{1}{104} \sum_{i=1}^{104} \delta(\theta - \theta_i)$$
(10.10)

ここで、 θ_i は各 GRB の天頂角である。

10.4 【確率密度分布】GRB 到来時における回転角度分布

10.2 節と 10.3 節の結果はそれぞれ、GRB ポインティング前の角度と GRB ポインティ ング後の角度に対応している。これらを用いて、GRB アラートを受信した際における、方 位角と天頂角それぞれに関する LST 回転角度確率密度分布の導出を行う。

^{*&}lt;sup>5</sup> 英語で表すと、Modified Julian Date

^{*6} RA, right-ascension

^{*7} Dec, declination



図 10.7 GRB の到来天頂角に関する確率密度分布。デルタ関数の重ね合わせとして定義している。

■方位角回転角度の確率密度分布

方位角回転角度 $\Delta \varphi$ は

$$\Delta \varphi = |\varphi_{\rm fin} - \varphi_{\rm ini}| \tag{10.11}$$

で定義される。 $\varphi_{ini}, \varphi_{fin}$ はそれぞれ 10.2 節と 10.3 節で述べた方位角に対応する。

ここで $\varphi_{\text{fin}} =: \varphi$ を固定したとき、式 (10.11) を満たす $\Delta \varphi$ がとる確率密度関数は次で与 えられる。

$$P(\Delta\varphi) = \int_0^{360} P_{fin}(\varphi) P_{ini}(\varphi - \Delta\varphi) \,d\varphi + \int_0^{360} P_{fin}(\varphi) P_{ini}(\varphi + \Delta\varphi) \,d\varphi \qquad (10.12)$$

ここで、 $P_{ini}(\varphi)$ は式 (10.1)の定義域を $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$ から $[-\infty, \infty]$ に拡張した 360°の周期 関数として再定義している。 $P_{ini}(\varphi)$ を代入、計算すると、図 10.8 で示すような方位角回 転角度確率密度関数 $P(\Delta \varphi)$ が次のように求まる。

$$\begin{split} \mathbf{P}(\Delta\varphi) &= \frac{1}{360} \left[\int_0^{360} \mathbf{P}_{\mathrm{fin}}(\varphi) \,\mathrm{d}\varphi + \int_0^{360} \mathbf{P}_{\mathrm{fin}}(\varphi) \,\mathrm{d}\varphi \right] \stackrel{\mathrm{Eq.}(10.3)}{===} \frac{1}{360} \left[1 + 1 \right] = \frac{1}{180} \ (10.13) \\ \mathbf{P}(\Delta\varphi) \ \mathcal{O}$$
定義域は $[0^\circ, 180^\circ] \ \mathsf{cbs5}_\circ$


図 10.8 GRB ポインティングの方位角回転角度に関する確率密度分布。確率密度関数 を黒色、その積分値を赤色で描いている。

■天頂角回転角度の確率密度分布

天頂角回転角度 $\Delta \theta = |\theta_{fin} - \theta_{ini}|$ の確率密度関数 P($\Delta \theta$) (定義域は [0°,65°])も同様 の議論から、 $\theta_{fin} =: \theta$ を固定したとき

$$P(\Delta\theta) = \int_{\Delta\theta}^{65} P_{fin}(\theta) P_{ini}(\theta - \Delta\theta) d\theta + \int_{0}^{65 - \Delta\theta} P_{fin}(\theta) P_{ini}(\theta + \Delta\theta) d\theta \qquad (10.14)$$

と表される。ここに式 (10.9) の P_{ini}(θ) *⁸および式 (10.10) の P_{fin}(θ) *⁹を代入して計算す る。得られた結果を図 10.9 に示す。

10.5 【確率密度分布】望遠鏡回転所要時間分布

続いて、LST が何秒でポインティングできる確率がどれくらいあるか、ということを議 論する。これは回転所要時間の確率密度分布を導出することに対応する。回転所要時間は、

^{*&}lt;sup>8</sup> 図 10.4(b) 参照。

^{*9} 図 10.7 参照。



図 10.9 GRB ポインティングの天頂角回転角度に関する確率密度分布。確率密度関数 を黒色、その積分値を赤色で描いている。青線は式 (10.14) 右辺第一項、緑線は第二項を 示している。

10.4 節で得た方位角と天頂角の回転角度のうち、より「大きい」一方にのみ依存する。こ の節ではまず、「大きい」回転角度の確率密度分布を求め、次に、回転角度と回転所要時間 の関係を定義して、最後に回転所要時間の確率密度分布を求める。

■「大きい」方の回転角度がとる確率密度分布

10.4 節で求めた $P(\Delta \varphi), P(\Delta \theta)$ の定義域はそれぞれ $[0^\circ, 180^\circ], [0^\circ, 65^\circ]$ である。ここで は都合上、

$$\begin{cases} \Delta \varphi \longrightarrow \Delta \tilde{\varphi} = \Delta \varphi / 180\\ \Delta \theta \longrightarrow \Delta \tilde{\theta} = \Delta \theta / 65 \end{cases}$$
(10.15)

という変数変換を施して $P(\Delta \varphi), P(\Delta \theta)$ を

$$\begin{cases} P(\Delta\varphi) \longmapsto \tilde{P}_{azi}(\Delta\tilde{\varphi}) \\ P(\Delta\theta) \longmapsto \tilde{P}_{zen}(\Delta\tilde{\theta}) \end{cases}$$
(10.16)

と改変する。定義域はともに [0,1] である。 $\tilde{P}_{azi}(\Delta \tilde{\varphi})$ と $\tilde{P}_{zen}(\Delta \tilde{\theta})$ の規格化定数は式 (10.3) を満たすように決められる。



図 10.10 GRB ポインティング時における「大きい」方の回転角度に関する確率密度分 布。*x*軸で定義された二つの量のうち、より大きい方の値についての確率密度関数を黒 色で描いている。また、積分値を赤色で描いている。

「大きい」という語は、「 $\Delta \tilde{\varphi}, \Delta \tilde{\theta}$ のうち大きい方」という意味としてここでは定義している。9.1 節で決めたように、LST は方位角 180° を 20 秒、天頂角 65° を 20 秒で回転するとする。したがって高速回転にかかる時間は、「大きい」回転角度

$$\Delta \psi = \max[\Delta \tilde{\varphi}, \Delta \theta] \quad (\hat{z}_{\bar{z}}_{\bar{z}}_{\bar{z}} : [0, 1]) \tag{10.17}$$

によって決まる。

 $\Delta \psi$ の確率密度関数 $P(\Delta \psi)$ は

$$P(\Delta\psi) = \int_{0}^{\Delta\psi} \tilde{P}_{azi}(\Delta\psi)\tilde{P}_{zen}(\Delta\tilde{\theta}) d(\Delta\tilde{\theta}) + \int_{0}^{\Delta\psi} \tilde{P}_{zen}(\Delta\psi)\tilde{P}_{azi}(\Delta\tilde{\varphi}) d(\Delta\tilde{\varphi})$$
(10.18)

によって導出される。右辺第一項は $\Delta \tilde{\theta} < \Delta \tilde{\varphi}$ かつ $\Delta \tilde{\varphi} = \Delta \psi$ となる全ての $\Delta \tilde{\theta}$ 、第二項 は $\Delta \tilde{\varphi} < \Delta \tilde{\theta}$ かつ $\Delta \tilde{\theta} = \Delta \psi$ となる全ての $\Delta \tilde{\varphi}$ について積分している。積分後の P($\Delta \psi$) を示したものが図 10.10 である。

■回転角度と回転所要時間の関係

 $\Delta \psi$ によって決められる回転所要時間 $T_{\rm rot} = f(\Delta \psi)$ を定義する。 $f(\Delta \psi)$ は LST がど



図 10.11 GRB ポインティング時の回転角度と回転所要時間の関係。(a) 回転所要時間 に関する回転角度の関数。(b) 関数の一階微分関数。回転角度の大きさによって、関数の 挙動が変化することに注意。



図 10.12 回転角度の大きさごとの LST の回転挙動を示した図。上から順に、回転角加 速度、回転角速度、回転角度。(A) 具体例 A に対応する。第6章と同じ条件。(B) 具体 例 B に対応する。(C) 具体例 C に対応する。(D) 具体例 D に対応する。仰角方向の回転 角加速度、回転角速度、回転角度については、図中の値の <u>65</u> 倍であることに注意。

のように回転するかに依存し、結果は図 10.11(a) で表される。ここでいくつか回転の具体 例を挙げる。

(A) $\Delta \psi = 1 \text{ Obs}$

このとき*¹⁰は 6.2 節の回転と同じなので、 $f(\Delta \psi) = 20 \sec 2 \cos (2000 \pm 10.12 \text{(A)})_{\odot}$ (B) $\Delta \psi = 0.6$ のとき

図 10.12(B) に示すように、6.2 節と同じ最大角加速度で最大角速度まで加速する。回転 角度が $\Delta \psi = 0.6$ に相当するように適切なところで減速、停止する。

(C) $\Delta \psi = 0.2$ のとき

回転角度があるところより小さくなると最大角加速度で加速しつつも、減速タイミング までに最大角速度に達することができなくなる (図 10.12(C))。このときは最大角速度に達 する前に減速、停止する。この挙動の違いのために、 $f(\Delta \psi)$ が変化する*¹¹。

(D) $\Delta \psi = 0.03$ のとき

6.2 節で述べたように、メカニカルへの負担を避けるため、最高角加速度に達するまでの 時間として jerk time を定義していた。 $\Delta \psi$ がさらに小さくなると最大角加速度に達する前 に減速する必要が生じる。図 10.12(D) が示すようにこのときは最大角加速度、最大角速度 に達する前に回転を終了するため、 $f(\Delta \psi)$ が変化する*¹²。

■回転所要時間の確率密度分布

 $T_{\rm rot} = f(\Delta \psi)$ を用いて、回転所要時間の確率密度関数 $P_{\rm r}(T_{\rm rot})$ を計算する。 $f(\Delta \psi)$ は 単調増加関数であり、このときの $P_{\rm r}(T_{\rm rot})$ は、

$$P_{\rm r}(T_{\rm rot}) = P\left(f^{-1}(T_{\rm rot})\right) \frac{d(f^{-1}(T_{\rm rot}))}{dT_{\rm rot}}$$
(10.19)

$$=\frac{\mathcal{P}(\Delta\psi)}{f'(\Delta\psi)}\tag{10.20}$$

で算出される。 f^{-1} は f の逆関数で、f' は f の微分関数である (図 10.11(b))。

図 10.13 にこの結果を示す*¹³。 $P_r(T_{rot})$ を用いると例えば 14 秒以内に GRB ポインティングが可能な確率は 50% だとわかる。

Prob.[0, 14] =
$$\int_0^{14} P_r(T_{rot}) dT_{rot} \sim 0.5$$
 (10.21)

 $_{*^{10}}$ つまり $\Delta \varphi = 180^{\circ}$ または $\Delta \theta = 65^{\circ}$ のとき。

^{*&}lt;sup>11</sup> 図 10.11(a) 青い線の挙動になる。

^{*&}lt;sup>12</sup>図 10.11(a) 緑の線。

^{*&}lt;sup>13</sup> $P_r(T_{rot})$ が非連続なのは、 $f'(\Delta \psi)$ (図 10.11(b)))が非連続だからである。



図 10.13 GRB ポインティングの回転所要時間に関する確率密度分布。確率密度関数を 黒色、その積分値を赤色で描いている。

10.6 【確率密度分布】GRB 発生から望遠鏡回転までの所要 時間分布

10.5 節までは、LST がアラートを受け取ったあとの振る舞いについて議論してきた。こ こからは、GRB が発生してから、LST が実際に何秒でポインティングをすることができる か議論していく。この時間を *T*_{GRB} と定義する。

3.2 節で述べたように、LST は GRB アラートを受け取ってから高速回転を始めるため、 T_{GRB} は、 T_{rot} だけでなく GRB アラート衛星が GRB を検知するまでの時間にも依存す る。ここで GRB 発生後からアラート送信までの時間を T_{alert} と定義する。アラート衛星 は GRB 発生後、13 秒から 30 秒の間に GRB 位置情報をアラートとして送信できることが



図 10.14 GRB 発生後からポインティング完了までの時間に関する確率密度分布。 (a)GRB 発生後からアラート送信までの確率密度関数。(b)GRB 発生後からポインティ ング完了までの確率密度関数。

わかっている*¹⁴。したがって T_{alert} が従う確率密度関数(図 10.14(a))を

$$P_{a}(T_{alert}) = \begin{cases} \frac{1}{30-13} & (13 \le T_{alert} \le 30) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$
(10.22)

と決定する。

 T_{GRB} を決める要素は T_{rot} と T_{alert} が支配的だと仮定して、

$$T_{\rm GRB} \simeq T_{\rm alert} + T_{\rm rot}$$
 (10.23)

と考える。GRB 発生から望遠鏡回転終了にかかる所要時間の確率密度関数は次のようになる*¹⁵。

$$P(T_{\rm GRB}) = \int_0^\infty P_{\rm r}(T_{\rm rot}) P_{\rm a}(-T_{\rm rot} + T_{\rm GRB}) dT_{\rm rot}$$
(10.24)

$$\stackrel{\text{E}_{\underline{q.(10.22)}}}{=} \frac{1}{17} \int_{T_{\text{i}}}^{T_{\text{f}}} P_{\text{r}}(T_{\text{rot}}) \, \mathrm{d}T_{\text{rot}}$$
(10.25)

ここで、

$$(T_{\rm i}, T_{\rm f}) = \begin{cases} (0, T_{\rm GRB} - 13) & (13 \le T_{\rm GRB} \le 30) \\ (T_{\rm GRB} - 30, T_{\rm GRB} - 13) & (30 \le T_{\rm GRB} \le 33) \\ (T_{\rm GRB} - 30, 20) & (33 \le T_{\rm GRB} \le 50) \end{cases}$$
(10.26)

^{*&}lt;sup>14</sup> https://gcn.gsfc.nasa.gov/swift.html 参照。Swift/BAT は GRB アラートを送る人工衛星のうち の一つである。

^{*&}lt;sup>15</sup>式 (10.23) を満たす T_{rot} に関して積分する。

である*¹⁶。図 10.14(b) は P(T_{GRB}) の計算結果を示している。ここから、

• GRB から 35 秒後までに ~ 50% の確率でポインティングを完了できる。

Prob.[0, 35] =
$$\int_0^{35} P(T_{\rm GRB}) \, \mathrm{d}T_{\rm GRB} \sim 0.5$$
 (10.27)

• GRB から 50 秒後までに 100% の確率でポインティングを完了できる。

ことがわかる*17。

10.7 GRB 即時放射の観測可能性

最後に、10.6節で得た結果を用いて LST による GRB 即時放射の観測可能性について議論する。

図 10.15 (b) の青と赤の斜線で示したものは BATSE 検出器*¹⁸が観測した全 GRB のうち、Short GRB または Long GRB だとわかっている (565+1366) 例*¹⁹ についての即時放射継続時間ヒストグラムである*²⁰。x 軸の「 T_{90} 」は即時放射継続時間に相当する量である。2.3 節で述べたように、 T_{90} は GRB 総フルーエンス*²¹の 5% が検出された時刻から 95% が検出された時刻までの期間で定義される*²²。

図 10.15 (a) は図 10.14(b) 赤線で示した P(T_{GRB}) 積分値*²³を x 軸対数表示したもので ある。図 10.15 の上下を照らし合わせると、特に Long GRB を LST が観測できることが わかる。

図 10.16 は x 軸を Long GRB 領域に絞って拡大している。赤色全体が Long GRB のヒ ストグラム*²⁴で、そのうち濃い領域が示すものが、Long GRB データをさらに LST ポイ ンティング確率*²⁵で重み付けして得られたヒストグラムである。両者の積分値を比較する。 この結果から私が開発した高速回転電源システムにより、LST が Long GRB の

$$\frac{672.3}{1366} \sim 0.5 \tag{10.28}$$

- *²⁴図 10.15 (b) と比較してビン幅を 1/3 にしている。
- *²⁵ 図 10.16 (a) 緑線。

^{*&}lt;sup>16</sup> 式 (10.26) 範囲外の T_{GRB} では $P(T_{\text{GRB}}) = 0$ である。

^{*&}lt;sup>17</sup> 計算は式 (10.21) 参照。図 10.14(b) の赤線に対応している。

^{*&}lt;sup>18</sup> Compton 衛星に搭載され、数千発の GRB を測定した。

^{*&}lt;sup>19</sup> ここでは、Shahmoradi & Nemiroff (2015)と Shahmoradi (2013a)の論文に書かれている Short GRB の 565 例と Long GRB の 1366 例を BATSE カタログから抽出してグラフを作成した。

^{*&}lt;sup>20</sup> x 軸のビンが "対数で" 等間隔に区切られていることに注意。

^{*&}lt;sup>21</sup> フラックスを積分した物理量。単位は erg/cm²。

^{*&}lt;sup>22</sup> T₉₀ については図 2.16 も参考にされたい。

^{*23} 式 (10.27) 参照。



図 10.15 GRB ポインティング確率と GRB 統計量との比較。【上】GRB ポインティン グが可能な確率。【下】GRB を持続時間ごとに分類したヒストグラム。x 軸を対数表示 していることに注意。濃い赤色の領域は、観測確率で重み付けした Long GRB のヒスト グラム。

50% に対して即時放射中の振る舞いを観測することができる。

10.8 まとめ

• 開発した高速回転電源システムによって、GRB 即時放射をどの程度観測できるかに ついて、以下の方法で算出した。



図 10.16 GRB ポインティング確率と Long GRB 統計量との比較。【上】GRB ポイ ンティングが可能な確率。【下】Long GRB を持続時間ごとに分類したヒストグラム。 Long GRB のみのヒストグラムを示している。ビン幅を 1/3 倍にしていることに注意。 濃い領域は、観測確率で重み付けした Long GRB のヒストグラム。

- MAGIC のデータを用いて、GRB ポインティング前の LST 測定角度に関する 確率密度分布を決めた。
- MAGIC がフォローアップ観測を試みた GRB についての到来角度データを用いて、GRB ポインティング後の LST 測定角度に関する確率密度分布を決めた。
- 上記二つを用い、ポインティング時における LST の回転角度に関する確率密度 分布を求めた。
- アラートを受信してから、ポインティングを終えるまでにかかる所要時間確率
 密度分布を計算した。
- GRB が発生してから、ポインティングを終えるまでにかかる所要時間確率密度 分布を計算した。

- GRB の即時放射に関するデータと計算結果を比較した。

この結果により、開発した電源システムによって、Long GRB のアラートを受けとると、50%のLong GRB を即時放射中に測定できる。

第11章

まとめと今後の展望

この研究は、次世代 IACT 天文台 CTA に設置される LST を用いて、GRB 即時放射を測 定するための、フライホイールを搭載した電源システムに関する開発を目的としていた。

結果の章では、現地で実施した試験により、フライホイールを用いた大電力供給機能および、停電時にも対応するための無停電電源機能が正常に作動することを示した。また、上記 二つの機能に関する様々な関係式を導出した。試験結果から、電源システムの各装置への 負荷を計算し、正常に高速回転を行うための条件を確定した。

議論の章では、開発した高速回転電源システムによって、Long GRB のうち 50% に対して、即時放射中に高速回転によるポインティングを完了できることを示した。

今回の開発研究は、LST の代わりとして、疑似負荷を用いた。今後の展望として、実際 にLST を用いた試験を行うことで、今回定義した望遠鏡構造体のモデルを改良することが 期待される。具体的には、電源システムからの情報、ドライブシステムからの情報、風向や 風速の情報を組み合わせることで、より現実の状況に近い、物理定数を算出することができ るはずである。それによって得られた知見は、LST 運用の際に有用となりうる。

また、今回の開発研究では、電源システムを構成する装置を読み取るために、一時的なモ ニタリングシステムを作成した。今後は、今回の知見を用いて、実際の観測運用のためのモ ニタリングシステムを開発することが期待される。

この論文の最終解析結果により、LST は Long GRB 即時放射のうち 50% が取れると述べた。最後に、実際に観測が始まってから、どの程度の頻度で GRB の観測が期待されるの か算出しておく。

現状、GRB のアラートは1日に~1回程度起きている。その他、観測に関わる要素を次のように仮定する。

 方位角全方向、仰角 0° から 65° までの観測で全天の ~ 1/4 をポインティングで きる。

- 測定ができる夜間は1日のうち~1/3程度である。
- •満月付近の日、および天候不順日は測定できない。その割合が月のうち ~ 1/2 程度 である。
- 全 GRB アラートのうち Long GRB は ~ 70% 程度である*¹。
- Long GRB アラートのうち観測可能なものは ~ 50% 程度である。

以上の要素を全て掛け合わせると、

$$1 \operatorname{GRB}/\operatorname{day} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 0.7 \times 0.5$$
$$\simeq \frac{1 \operatorname{GRB}}{70 \operatorname{days}} \tag{11.1}$$

2か月に一度くらいの頻度で詳細な Long GRB の即時放射が観測されることが推定される。

LST の観測が開始され、実際に Long GRB の即時放射を検出できるようになると、 式 (2.24) により、ジェットの Lorentz factor の下限値を詳細に決定できるはずである。こ れによって、GRB の即時放射が従う超高エネルギーガンマ線天体物理学がさらに拓かれて いくことが期待される。

Appendix

A 三号機、四号機の疑似負荷試験

第7章ではエネルギーコンテナ二号機の試験結果を用いて、解析を行った。その理由は 注 *12 でも述べたように、

- ・ 三号機はテスト後に業者が設定を変えたため今回の結果が使えない可能性がある
 から。
- 四号機は 403 kW の放電テストしか行えなかったから。

である。したがって三、四号機の結果は放電試験での各出力条件ごとの結果をここに一つ ずつ示すにとどめる。

図 A.1 はエネルギーコンテナ三号機の放電試験結果*¹を示す。出力条件は二号機と同じ である*²。

図 A.2 は四号機の試験日に関する UPS コントローラーの読み取り値およびフライホイー ルの読み取り値である。403 kW 出力試験結果のうちの一つを例として図 A.3 に示す。

B 瞬間風速の計算

6.4節で述べた瞬間風速についての議論をここにまとめる。

CTA の内部文章 "Environmental Requirements for CTA"の中に平均風速と瞬間風速の 関係式について述べられているが、その論拠としては例えば論文 Ashcroft (1994)が挙げら れる。これを参考に、平均風速と瞬間風速の関係性を説明し、計算結果を示す。

変数の定義として、

- T 秒間の平均風速:V_{mean}
- t 秒間の平均風速のうち最大値: V_{gust}

^{*&}lt;sup>1</sup> 図 7.4 に相当。

^{*&}lt;sup>2</sup> 7.2 節参照。



図 A.1 大電力供給試験結果の例 (コンテナ三号機)。(a) 出力 45 kW での例。 (b)50 kW。(c)70 kW。(d)90 kW。(e)120 kW。(f)170 kW。(g)220 kW。(h)270 kW。 (i)320 kW。(j)370 kW。(k)420 kW。



図 A.2 大電力供給試験の様子(コンテナ四号機)。(a 上)電源システムの出力。(a 中 央) UPS コントローラーから二つのフライホイールへ供給される電力。(a 下) フライホ イールの充電および放電を示す信号。(b 上) フライホイールが示すエネルギー残量。(b 中央) フライホイールの真空容器の真空度。(b 下) UPS コントローラーからそれぞれの フライホイールへの入力。

とする。 V_{gust} は V_{mean} を用いて、

$$V_{\text{gust}} = V_{\text{mean}} \times G(T, t) \tag{B.1}$$

と表現できる。ここで G(T,t) は gust factor と呼ばれ、

$$G(T,t) = 1 + 0.42 \times I \times \ln(T/t) \tag{B.2}$$



図 A.3 大電力供給試験結果の例(コンテナ四号機)。出力 403 kW での例。

であり、Iは turbulence intensity*³

で、ここでは

$$I = 0.25$$
 (B.3)

とする。

したがって、10 分間の平均風速 $V_{\text{mean}} = 36 \text{ km/h}$ のとき、(T, t) = (600, 1)を代入すると、1 分間の突風は

$$V_{\text{gust}} = V_{\text{mean}} \times G(600, 1)$$
$$= 60 \,\text{km/h} \tag{B.4}$$

となる。

C 効率の計算

6.8 節で述べた効率 e = 0.71 という導出についてここで説明する。電源システムから供給される電力は、望遠鏡の回転エネルギーに変換されるまでに、次に述べる装置を経由する。それぞれ*4の効率を次のように定義する。

• $e_{\text{smart}} := 0.98$ (Smart Line Module)

^{*3} I は平均速度の割合として表現される、風の変動についての標準偏差である。

^{*&}lt;sup>4</sup> Smart Line Module は Rectifier の役割を持つ装置。Single Line Module は Inverter。Reducer は日本語の 減速機に対応。



図 C.1 歯車に関する情報。(a) 歯車接合部の拡大図。https://en.wikipedia.org/ wiki/Involute_gear の図を改変。(b) 実際の歯車の寸法図。内部資料 "LST Azimuth Assembly" より引用。

- $e_{\text{single}} := 0.98$ (Single Motor Module)
- $e_{\text{motor}} := 0.93$ (Motor)
- e_{reducer} (Reducer)
- *e*_{rack_pinion} (Rack & Pinion)

すでに数値が定義されているものはカタログに記載されていた効率の値を採用している。 これに加え、

- e_{other} := 0.95 (ドライブシステム内の他装置による損失)
- e_{joule} := 0.95 (回路のジュール熱による損失)

の二点を定義する。

以下では e_{rack_pinion} および e_{reducer} を定義する。

Rack & Pinion

図 C.1 (a) は歯車どうしの接合部の拡大図、図 C.1 (b) は望遠鏡に使われる歯車の寸法で ある。図が示すように歯車は接触面を少しずつずらしながら動力を伝え、接触面には垂直 抗力 F_{nor} が働く。Rack & Pinion の効率は、 F_{nor} がもたらす転がり摩擦による仕事率の損 失によって定義する。

転がり摩擦は $F_{roll} = C_{rr}F_{nor}$ によって定義される。ここで C_{rr} として鉄のレールと鉄輪



図 C.2 減速機に関する情報。内部資料 "GEARBOX TECHNICAL DATA" より引用。 実際の減速機の寸法図。黄色い丸は歯車同士の接合部と考えられる。

の転がり摩擦 $C_{rr} = \frac{0.5 \text{ mm}}{r}$ を用いる。rは曲率半径でr := 33 mmと定義する。すると

$$F_{\rm roll} = 0.015 \times F_{\rm nor} \tag{C.5}$$

となる。RをLST回転半径、Tを望遠鏡に働くトルク*5とすると、

- ・ 歯車の動く速さ $v := R\omega$
- $F_{\text{nor}} := T/R$

であるから、転がり摩擦による仕事率の損失は

$$\Delta P_{\text{loss}} = F_{\text{roll}} \times v \stackrel{\text{Eq.(C.5)}}{=\!=\!=} 0.015 \times T\omega \stackrel{\text{Eq.(6.8)}}{=\!=\!=\!=} 0.015 \times P_{\text{LST}} \tag{C.6}$$

となる。図 C.1 が示すように、力を及ぼす側と及ぼされる側の両方で仕事率損失が生じる ため、効率 e は

$$e_{\text{rack_pinion}} := 1 - \frac{\Delta P_{\text{loss}} \times 2}{P_{\text{LST}}} \stackrel{\text{Eq.(C.6)}}{=} 0.97$$
(C.7)

と定義される。

Reducer

図 C.2 は LST で使われる Reducer の図面である。ここから、Reducer は 4 つの歯車が 連結しており、接触点が三点あると判断する。 v, F_{nor} は Rack & Pinion でのそれらと等し いため、仕事率損失は Rack & Pinion の場合の 3 倍になる。

$$e_{\rm reducer} := 1 - \frac{\Delta P_{\rm loss} \times 2 \times 3}{P_{\rm LST}} = 0.91$$
(C.8)

^{*5 6.6} 節で定義したもの。

■効率 e

以上の結果から効率は

$$e = \prod_{i}^{\text{All}} e_i = 0.71 \tag{C.9}$$

と求まる。

D LST 構造体資料

6.3 節、6.4 節での計算に用いた $I \ge M$ を決定するために用いた資料をここにまとめる。 図 D.1、図 D.2、および図 D.3 は CTA の内部文章 "Large Size Telescope Technical Design Report" にまとめられた、LST の慣性モーメントおよび重量に関する図である。この資料 の赤丸および橙色の丸で囲った部分の値を参考に、

- $I_{azi} = 13,100 \text{ ton } \text{m}^2$
- $I_{\rm ele} = 5,140 \, {\rm ton} \, {\rm m}^2$
- $M_{\rm azi} = 122.2 \, {\rm ton}$
- $M_{\rm ele} = 60.1 \, {\rm ton}$

と決定した。

E 電源システムに関する資料

4.2節で述べた電源システムについて、より詳細な資料をここにまとめる。

図 E.1 は電源システムのうち、常用電源、非常用発電機および、Automatic Transfer Switch(ATS) についての単線結線図についての資料である。図を縦長に見たとき、左下が常用電源、右下が非常用発電機、点線で囲まれた領域が ATS に対応している。停電が発生すると、非常用発電機が作動して、ATS が自動で非常用発電機に入力を切り替える。 ATS の情報は Modbus プロトコルによって遠隔からモニタリングをすることができる。 ATS の出力側には、

- エネルギーコンテナ ×4
- IT コンテナ
- コミッショニングコンテナ
- MST
- 予備

	Element	Allocated	Inertia' (LST Specifi	cations)	Estir	mated Inertia	in Azimuth and	Elevation		2	largin² (co	ntingen cy)		PR Status 3	Comments
PBS Code	LST Mechanics Budget	Code	Azimuth Operation 90° (proposed limit)	Elevation Operation (proposed limit)	Azimuth Operation 90°	Uncertaint/	t Elevation Operatio	n Uncer	tainty⁴	Azimuth O 90°	peration	Elevation	Operation		
			[ton x m ²]	[ton x m ²]	[ton x m ²]	[ton x m ²] [9	6] [ton x m ²	*] [ton x m	2] [%]	$[ton \times m^2]$	[%]	$[ton \times m^2]$	[%]		
8.1	Mechanical System														
8.1.1	Mount														
8.1.1.1	Lower Structure (incl. Tubes, Endpieces, Knots)	,	3695.0		3595.1	71.9		1	1	9.99	3%			Ч	estimation derived from final CAD model, incl. azimuth bogie knots
8.1.1.2.1 + 8.1.1.2.3 + 8.4.5.9 to 8.4.5.12	Elevation Drive Support (incl. Locking, Motors, Gearboxes. Brake)		14.0		13.4	0.3	%2			0.6	4%			Ы	estimation derived from final CAD model
8.1.1.2.2	Elevation Bearings		1527.0		1435.3	28.7	2% -	•		91.7	%9		•	ЬР	from RSTAB calculations, uncertainty 20%
8.1.1.3.2 + 8.1.1.3.4 + 8.4.5.4 to 8.4.5.6	Bogies (incl. Locking, Motors, Gearboxes, Brakes)		2860.0		2744.5	54.9	2% -	•		115.5	4%			Ы	estimated from final design
8.1.1.3.3	Central Pin (only movable knot of bearing head)		0.0		0.0	0.0		•	•	0.0	17%			ЪР	estimation derived from final CAD model (almost 0!)
8.1.1.4	Access (Stairs, Catwalk, Safety Equipment)		439.0	-	430.0	8.6	2% -	•		9.0	2%		•	Ы	estimation derived from final CAD model
8.1.2	Optical Support Structure														
8.1.2.1.1 + 8.1.2.1.2 + 8.1.2.1.3	Dish Structure (incl. Tubes, Endpieces, Knots)		970.0	1120.0	905.0	18.1	2% 10	52.0 21	.0 2%	65.0	7%	68.0	6%	РР	estimation derived from final CAD model
8.1.2.1.4	Tension Cables (Drive Arch)		20.0	10.0	14.0	0.3	2%	7.0 6	.1 2%	6.0	43%	3.0	43%	РР	estimated from final design
8.1.2.1.5	Counterweight		280.0	314.0	139.7	7.0	5% 1!	57.0 7	.9 5%	140.3	100%	157.0	100%	DF	estimated from final design
8.1.2.1.6	Elevation Drive Arch		520.0	625.0	500.4	10.0	2% 6(70.7 12	.0 2%	19.6	4%	24.3	4%	Ч	estimation derived from final CAD model
8.1.2.2.1	Camera Frame		380.0	380.0	380.0	19.0	Ř	30.0 15	0.						continuous for azimuth and almutice calculated are to
8.1.2.2.2	Camera Mast		415.0	540.0	415.0	20.8	5% 54	40.0 27	.0 5%	134.8	14%	139.6	13%	DF	contringencies for azimutin and erevation caroulated acc. to more buildret
8.1.2.2.3	Tension cables and anchoring devices		175.0	150.0	175.0	8.8	1	50.0	.5						
8.1.2.3	Access (Stairs, Catwalk, Safety Equipment)		80.0	80.0	70.0	1.4	2%	70.0	.4 2%	10.0	14%	10.0	14%	РР	estimated from final design
8.2	Optical System														
8.2.1	Primary Mirror (incl. Facets and Pads)	-	341.0	385.0	310.0	15.5	5% 3!	50.0 17	.5 5%	31.0	10%	35.0	10%	DF	estimated for 198 facets
8.2.2.1	Actuators		38.0	43.0	35.0	1.8	5%	2 0.0t	.0 5%	3.0	%6	3.6	8%	DF	estimated for 198 actuator sets
8.2.2.2	Interface Plates		61.0	68.0	54.0	1.1	2%	50.0	.2 2%	7.0	13%	8.0	13%	ЪР	estimated for 198 plates
8.2.2.4	AMC Cameras (on each mirror)		8.0	0.6	3.5	0.2	5%	4.0 6	.2 5%	4.5	129%	5.0	125%	DF	estimated for 198 Lasers
8.2.2.3 + 8.2.2.5	AMC Control and Power Boxes + AMC Cabling		14.0	15.0	9.0	1.4 1	2%	10.01	.5 15%	5.0	26%	5.0	50%	DP	estimated for 198 mirrors
8.3	Camera (excl. External cooling and cabling and Server) (SEE DEDICATED MASS BUDGET)		1900.0	1900.0	1520.0	76.0	5% 15,	20.0	.0 5%	380.0	25%	380.0	. 25%	DF	
8.3.4.3.2	Cooling System (external Part)		60.0		40.0	2.0		-	-	20.0	50%	-		DF	estimated: 400 kg @ R = 10 m
8.3.4.10	Camera External Cabling (along Mast)		35.0	35.0	20.8	3.1 1!	2 %	20.8	.1 15%	14.2	68%	14.2	. 68%	DP	estimated with 3 kg/m for cables, cooling pipes and fixation, start @ $y = 0$ m, end @ $y = 27.5$ m
8.4	Auxiliary								%0						
8.4.3	Calibration and Pointing Control		0.3	0.3	0.1	0.0	5%	0.1 0	.0 5%	0.2	140%	0.2	140%	DF	conservative estimation
8.4.7	Structure Condition Monitoring		0.3	0.3	0.1	0.0 2!	2%	0.1 6	.0 25%	0.2	140%	0.2	140%	ND	conservative estimation
8.4.8.1	Azimuth Cable Chain		10.0		8.9	0.4				1.1	12%			DF	estimated as a hollow cylinder with according dimensions from final CAD model
8.4.8.2	Elevation Cable Chain		1.0	1.0	0.3	0.0	5%	0.3 6	.0 5%	0.7	251%	0.7	251%	DF	estimation derived from MAGIC construction
8.4.8.3	Cable Ducts		0.8	0.8	0.5	0.1 1	%5	0.5 6	.1 15%	0.3	%09	0.5	%09	DP	conservative estimation
		Total Sum ⁵	13076.3	5140.3	12819.7	256.6	2% 49	52.5 177	.7 4%	0.0	0%	0.0	%0		no margin foreseen to limit drive power
	TOTAL	C-LST- MECH.0167	12000.0							-819.7	-6%				margin due to limit value
		C-LST- MFCH 0166		6000.0								1037.5	21%		margin due to limit value
				Í	Í				Ĩ				ĺ		

¹) Values in this column represent worst case maximums never to be exceeded in the produced element. This numbers should be considered for dimensioning of elements. ¹/Margin must be 215% for preliminary designs, 25% for transformed to manufacture final designs and 22% for produced pieces. ³ Product Readiness (PR) Stutus: No Hoo Defined). Per Peniminary Design/Calculations, PP = Produced/Purchased Pieces. ³ The totals for uncertainty are calculated with 2*RMS of individual numbers; for margin they are set to zero.

図 D.1 LST の方位角および仰角の慣性モーメントについてまとめた資料。

	Element	Allocated Mass ¹ (LS ⁻	T Specifications)	Estima	ted Mass		Margin² contingency	PR Stat	s Comments
PBS Code	LST Mechanics Budget	Code	Operation (proposed limit)	Operation	Uncertai	hty⁴			
			[tons]	[tons]	[tons] [%] [t	ons] [%]		
3.1	Mechanical System								
3.1.1	Mount								
1.1.1	Lower Structure (incl. Tubes, Endpieces, Knots)	C-LST-MECH.0205	32.0	31.14	0.62	2%	0.86	PP %	from MERO mass table (14.03.2016), incl. azimuth bogie knots
3.1.1.2.1 + 8.1.1.2.3 + 3.4.5.9 to 8.4.5.12	Elevation Drive Support (incl. Locking, Motors, Gearboxes, Brake)	C-LST-MECH.0204	2.0	1.98	0.04	2%	0.02	PP %	estimation derived from final CAD model and data sheets
3.1.1.2.2	Elevation Bearings	C-LST-MECH.0220	10.0	9.41	0.19	2%	0.60 6	9% PP	mass from MERO packing lists 1, 2 and 4 (10.11.2016)
3.1.1.3.2 + 8.4.5.4 to 3.4.5.6	Bogies (incl. Gearboxes, Motors and Brakes)	C-LST-MECH.0212	20.0	19.25	0.39	2%	0.75	dd %1	estimation derived from final CAD model and data sheets
3.1.1.3.3	Central Pin	C-LST-MECH.0215	(4.0)	(3.6)	(0.1) ((2%)	(0.4) (109	4d (%	estimation derived from final CAD model [®])
8.1.1.4	Access (Stairs, Catwalk, Safety Equipment)	C-LST-MECH.0208	4.0	3.924	0.08	2%	0.08	PP %3	mass from MERO packing lists 1 and 2 (10.11.2016) + 1 ton estimated for Elevation Drive Platform
3.1.2	Optical Support Structure								
3.1.2.1.1 + 8.1.2.1.2 + 3.1.2.1.3	Dish Structure (incl. Tubes, Endpieces, Knots)	C-LST-MECH.0362	19.0	17.90	0.36	2%	1.10 6	NP PP	from MERO mass table (14.03.2016)
3.1.2.1.4	Tension Cables (Drive Arch)	C-LST-MECH.0370	0.5	0.35	0.01	2%	0.15 43	MPP %	from MERO mass table (14.03.2016)
3.1.2.1.5	Counterweight (adjustable)	C-LST-MECH.0366	2.0	1.00	0.05	5%	1.00 100	I% DF	calculated from "Balancing Budget"
3.1.2.1.6	Elevation Drive Arch	C-LST-MECH.0364	6.0	5.78	0.12	2%	0.23	PP %1	estimated from final design
3.1.2.2.1	Camera Frame	C-LST-MECH.0529	0.5	0.50	0.03	5%			overall contingency of 0.1 tons foreseen for this items
3.1.2.2.2	Camera Mast	C-LST-MECH.0530	1.4	1.40	0.07	5%	0.10	1% DF	(remired by LAPP)> added to total sum
3.1.2.2.3	Tension cables and anchoring devices	C-LST-MECH.0532	0.6	0.60	0.03	5%			
3.1.2.3	Access (Stairs, Catwalk, Safety Equipment)	C-LST-MECH.0371	2.0	1.84	0.04	2%	0.16 8	3% PP	mass from MERO packing lists 2 and 4 (10.11.2016)
3.2	Optical System								
3.2.1	Primary Mirror (incl. Facets and Pads)	C-LST-OPT.0612	10.0	9.11	0.46	5%	0.89 10	1% DF	estimated: 46 kg x 198 facets
3.2.2.1	Actuators	C-LST-OPT.0406	1.1	1.04	0.05	5%	0.06	3% DF	estimated: 5.23 kg x 198 actuator sets
3.2.2.2	Interface Plates	C-LST-0PT.0410	2.0	1.78	0.04	2%	0.22 12	% PP	final version: 9 kg x 198 plates
3.2.2.4	AMC Cameras (on each mirror)	C-LST-OPT.0614	0.4	0.18	0.01	5%	0.22 124	.% DF	estimated: (0.2 kg Camera + 0.5 kg fixation + 0.2 kg cabling) x 198 mirrors
3.2.2.3 + 8.2.2.5	AMC Control and Power Boxes + AMC Cabling	C-LST-OPT.0416	0.8	0.55	0.08	15%	0.25 45	% DP	estimated: 0.25 kg Controller × 198 mirrors + (2 kg AMC PS + 6.6 kg Computing + 30 kg Cabling) × 13
3.3	Camera (excl. External cooling and cabling and Server) (SEE DEDICATED MASS BUDGET)	C-LST-CAM.0500	2.5	2.00	0.10	5%	0.50 25	% DF	limited by specification
3.3.4.3.2	Cooling System (external Part)	C-LST-CAM.0665	0.6	0.40	0.02	5%	0.20 50	I% DF	estimated: 380 kg for Chiller + 20 kg for purge box
3.3.4.10	Camera External Cabling	C-LST-MECH.0513	0.3	0.18	0.03	15%	0.12 67	dO %	estimated: 3 kg/m x 60 m for cables, cooling pipes and fixation; specified for dimensioning: 10 kg/m
3.4	Auxiliary Systems								
3.4.3	Calibration and Pointing Control	C-LST-MECH.0980	1.0	0.50	0.03	5%	0.50 100	I% DF	conservative estimation
3.4.7	Structure Condition Monitoring	C-LST-MECH.1200	1.0	0.50	0.13	25%	0.50 100	WD %	conservative estimation
3.4.8.1	Azimuth Cable Chain	C-LST-MECH.0215	(2.0)	(1.8)	(0.1) ((2%)	(0.2) (119	%) DF	conserv.estimation from final Brevetti CAD model ⁶)
3.4.8.2	Elevation Cable Chain	C-LST-MECH.0221	4.0	1.14	0.06	5%	2.86 251	% DF	estimated from final design
3.4.8.3	Cable Ducts	C-LST-MECH.0365	3.0	2.00	0.30	15%	1.00 50	1% DP	conservative estimation
	TOTAL	Total Sum ⁵	122.2	$\sum_{114.4}$	2.07	2%	7.73	%	margin bigger than uncertainty> OK
		C-LST-MECH.0158	125.0				0.55 5	%6	margin bigger than uncertainty> OK

図 D.2 LST の総重量についてまとめた資料。

¹) Values in this column represent worst case maximums never to be exceeded in the produced element. This numbers should be considered for dimensioning of elements. ²) Margin must be L15% for preliminary designs. Si% for ready to manufacture final designs and 22% for produced pieces. ³) Product Readiness (PR) Status: ND = Nu predimed. OR = Produced pieces. ³) Product Readiness (PR) status: ND = Nu product Readiness (PR) Status ³) The totals for uncertainty and margin are calculated with 2*RNS of individual numbers.

						budget> added to			cables, cooling pipes un (for 10 kg/m)									and 5 (10.11.2016),	d 5 (10.11.2016),																
Comments						contingency calculated acc. to mass	total sum		estimated acc. to 3 kg/m x 28 m for and fixation: limit acc. to specificatio		C.O.G. from final design	D	elevation axis (global x axis)			C.O.G. from final design		mass from MERO packing lists 3, 4 ^s C.O.G. from MERO Design Ver. 13	mass from MERO packing lists 4 and C.O.G. from MERO Design Ver. 13	C.O.G. from final design	C.O.G. from final design	C.O.G. from final design	C.O.G. estimated		C.O.G. from final design	estimated for 198 actuator sets	estimated for 198 plates	C.O.G. from final design	estimated for 198 mirrors		conservative estimation	conservative estimation	conservative estimation		
PR Status 3						DF	<u> </u>	DF	DP		DF					РР		РР	РР	РР	DF	ЪР	РР		DF	DF	РР	DF	DP		DF	QN	DP		
in² ency)		[%]				13%		25%	257%		251%	31%				1%		2%	15%	43%	100%	4%	8%		10%	6%	12%	124%	45%		100%	100%	50%	18%	
Marg (conting		[tons x m]				5.31		13.76	3.27		0.90	30.26				-0.05		-1.01	-2.56	-1.17	-11.80	-1.82	-0.21		-0.22	-0.02	-0.08	-0.06	-0.32		-0.70	-1.05	-1.30	-24.90	
	inty*	[%]			9 5%	5%	L 5%	5%	9 15%		5%	6%				0 2%		3 2%	4 2%	5 2%	9 5%	4 2%	5 2%		1 5%	2 5%	1 2%	0 5%	1 15%		4 5%	5 25%	9 15%	3 2%	
pe	Uncerta	[tons x m]			0.65	1.06	0.31	2.75	0.19		0.02	6.10				-0.1		-0.8	-0.3	10.0-	-0.5	-0.9	-0.0		-0.1.	-0.0	-0.0	0.00	-0.1		-0.0-	-0.2t	-0.3	-3.00	
Estimate	Torque Operation	[tons x m]			13.76	21.19	6.25	55.03	1.27		0.36	97.85				-5.02		-41.63	-16.91	-2.73	-11.80	-46.82	-2.43		-2.29	-0.40	-0.66	-0.04	-0.72		-0.70	-1.05	-2.60	-135.82	
	Mass Operation	[tons]			0.50	1.40	0.60	2.00	0.08		1.14	5.72				1.98		12.69	5.21	0.35	1.00	5.78	1.84		9.11	1.04	1.78	0.18	0.55		0.50	0.50	2.00	44.51	
Specifications)	Torque Operation (proposed limit)	[tons x m]			13.8	21.2	6.3	68.8	4.5		1.3	128.1				-5.1		-42.6	-19.5	- 3.9	-23.6	-48.6	-2.6		-2.5	-0.4	-0.7	-0.1	-1.0		-1.4	-2.1	- 3.9	-160.7	
Allocated' (LST :	Mass Operation ((proposed limit)	[tons]			0.5	1.4	0.6	2.5	0.3		4.0	9.30				2.0		13.0	6.0	0.5	2.0	6.0	2.0		10.0	1.1	2.0	0.4	0.8		1.0	1.0	3.0	50.80	
C.O.G.		[m]			27.52	15.13	10.42	27.52	15.12		0.31	17.10				-2.53		-3.28	-3.25	-7.80	-11.80	-8.11	-1.32		-0.25	-0.38	-0.37	-0.25	-1.30		-1.40	-2.10	-1.30	-3.05	
Element	LST Mechanics Budget		Mechanical System	Optical Support Structure	Camera Frame	Camera Mast	Tension cables and anchoring devices	Camera (excl. External cooling and cabling and Server) (SEE DEDICATED MASS BUDGET)	Camera External Cabling (only along Mast)	Auxiliary	Elevation Cable Chain	Total Sum ⁵	-	Mechanical System	Mount	I Elevation Drive Support (incl. Locking, Motors, Gearboxes, Brakes)	Optical Support Structure	Tubes with End-Pieces	Knots	Tension Cables (Drive Arch)	Counterweight (adjustable)	Elevation Drive Arch	Access (Stairs, Catwalk, Safety Equipment)	Optical System	Primary Mirror (incl. Facets and Pads)	Actuators	Interface Plates	AMC Cameras (on each mirror)	AMC Control and Power Boxes + AMC Cabling	Auxiliary	Calibration and Pointing Control	Structure Condition Monitoring	Cable Ducts	Total Sum ⁵	
	PBS Code		8.1	8.1.2	8.1.2.2.1	8.1.2.2.2	8.1.2.2.3	8.3	8.3.4.10	8.4	8.4.8.2			8.1	8.1.1	8.1.1.2.1 + 8.1.1.2.3 + 8.4.5.9 to 8.4.5.12	8.1.2	8.1.2.1.1 + 8.1.2.1.2	8.1.2.1.3	8.1.2.1.4	8.1.2.1.5	8.1.2.1.6	8.1.2.3	8.2	8.2.1	8.2.2.1	8.2.2.2	8.2.2.4	8.2.2.3 + 8.2.2.5	8.4	8.4.3	8.4.7	8.4.8.3		

図 D.3 LST の回転構造体の重量についてまとめた資料。

è ase ¹) Values in this column represent

eded in the produced element. This numbers should be considered for dimensioning of elements. worst

³ Margin must be 215% for preliminary designs, 25% for ready to manufacture final designs and 22% for produced pieces.
³ Product Readiness (PR) Status: ND = Not Defined, DP = Preliminary Design/Calculations, DF = Final Design/Calculations,

Uncertainties depending on Product Readiness (PR) Status
 The totals for uncertainty and margin are calculated with 2*RMS of individual numbers



図 E.1 電源システムの単線結線図(常用電源、非常用発電機および ATS)。



図 E.2 電源システムの単線結線図(エネルギーコンテナ内全体図)。



図 E.3 電源システムの単線結線図 (エネルギーコンテナ内詳細:エアコン)。



図 E.4 電源システムの単線結線図(エネルギーコンテナ内詳細:その他システム)。



図 E.5 モニタリングシステムのネットワーク接続図。

が接続される。

図 E.2 はエネルギーコンテナ内の単線結線図についての資料である。図を横長に見たと き、下側が ATS からの入力側(つまり図 E.1 の出力側)と接続している。左上が望遠鏡へ の出力側に対応している。入力は三つに分けられ、それぞれ、

- UPS システム
- ・エアコン
- その他

と接続する。UPS システムのところには、

- Rectifier
- Inverter
- フライホイール ×2

があることが確認できる。図 4.2 もあわせて参照されたい。UPS コントローラーとフライ ホイールは Modbus プロトコルによって遠隔からモニタリングをすることができる。

図 E.3 はエネルギーコンテナ内のエアコンに関する単線結線図である。図を横長に見た とき、下側がエネルギーコンテナからの入力側(つまり図 E.2 のエアコン出力側)と接続 している。出力はエアコン二つとスペアである。エアコンは Modbus プロトコルによって 遠隔からモニタリングをすることができる。

図 E.4 はエネルギーコンテナ内のその他の装置に関する単線結線図である。図を横長に 見たとき、下側がエネルギーコンテナからの入力側(つまり図 E.2 のその他出力側)と接 続している。出力はモニタリングシステム、非常用ライト、火災報知器などがある。モニタ リングシステムの中にはバッテリーが備え付けられてあるので、停電が起きても遠隔から の情報読み取りを行うことができる。火災報知器などのセンサーは Modbus プロトコルに よって遠隔からモニタリングをすることができる。

続いて、4.5 節で述べたモニタリングシステムの詳細をここにまとめる。図 E.5 はモニタ リングシステムのネットワークに関する図である。実験のセットアップでは、図を横長に 見て、中央にあるコミッショニングコンテナというところにパソコンを設置した。

- コミッショニングコンテナ
- エネルギーコンテナ ×4
- ATS
- 非常用発電機

の間はネットワークが繋がっている。エネルギーコンテナ、ATS、非常用発電機の中では、

監視装置がネットワークに接続されている*⁶。監視装置はそれぞれ IP アドレスが割り当て られており、server として振る舞う。client からの Modbus TCP 通信により、Modbus プ ロトコルでの情報の読み出しができる。監視装置は各装置と接続されているため、遠隔で

- UPS コントローラー
- フライホイール
- 温湿度計
- 各ブレーカー
- 非常用発電機の燃料
- 火災報知器
- ・エアコン

などの値を読み取ることができる。

^{*6} 監視装置は、図 E.5 中の "Wago 750-880/040" もしくは "Mgate MB3170" に対応している。(この論文の 電子ファイルでの拡大を推奨する。)

謝辞

この論文を書くにあたり、非常に多くの方にお世話になりました。

指導教員の手嶋政廣教授には特に、心から感謝いたします。より良い修士論文を完成さ せるために、多くの考え方を教えてくださり、勉強させていただきました。週のミーティ ングでは、常にフィードバックのコメントをいただきました。また、未熟な面が多々あっ た私に、時に優しく、時に厳しく、科学者としての姿勢を教えてくださいました。この研究 を行うにあたり、海外での試験が必要でしたが、多大な金銭的援助をしてくださいました。 ありがとうございました。

野田浩司准教授には、電源システムに関する数多くの相談にのっていただきました。特 に現地での試験の際に発覚した問題点などに関して、常に生産的な助言をしてくださいま した。研究での疑問点に対しても、時間を割いて対応していただきました。感謝いたしま す。Daniel Mazin 特任准教授には、現地での試験監督および、論文執筆の際に必要な情報 の相談などで大変お世話になりました。齋藤隆之特任助教には、私の研究に関する最初の 出張の際に、一対一で時間を割いてくださり、基礎を含め、多くのことを教えていただきま した。ありがとうございました。吉越貴紀准教授には、研究が行き詰まった時に、親身に 対応してくださり、助言していただきました。困っている時に、いつも気にかけてくださ り、ありがとうございました。Daniela Hadasch 特任助教には、英文のチェックをしてくだ さったり、スペイン語の表現について教えていただきました。大石理子助教には、週のミー ティングの時に、生産的なコメントを数多くいただきました。ありがとうございました。

Antonios Dettlaff さん、猪目佑介技術専門職員、深見哲志さん、および稲田知大さんに は、現地での試験の際に、多くの力を貸していただきました。特に、Antonios さんと猪目 さんには、非常に長い時間と労力を割いていただきました。お二人がいなければ、この論文 は完成しませんでした。この場を借りてお礼申し上げます。

Alessio Berti さんには、議論の章での解析に際しまして、お力添えいただきました。石崎 渉さんには、目的の章に関する構築や表現など、多くの意見をいただきました。また、修士 一年生の時のゼミでは、多くのことを学ばせていただきました。ありがとうございました。 高橋光成特任研究員、永吉勤さん、岩村由樹さん、櫻井駿介さん、および砂田裕志さんに は、物理の議論に付き合っていただいたり、解析の際に多くの知恵をくださったりと、大変 お世話になりました。大谷恵生さん、小林志鳳さんには、論文の表現について率直な意見を いただきました。ありがとうございました。

電源システムの研究にあたって、株式会社日立システムズの皆さんには大変お世話にな りました。特に、前田昭夫さんには、現地での試験の際に、強電に関する知識など、多くの ことを教えていただきました。

秘書の菅原みどりさんには、出張や手続きの手配だけでなく、数多くの精神的なサポート をしていただきました。どうもありがとうございました。

最後に、ここには書ききれませんが、論文の表現に関して、助言をしてくださった多くの 友人に感謝いたします。みなさんの助けや支えがあり、この論文を完成させることができ ました。ありがとうございました。そして、修士課程まで、金銭的な援助をしていただき、 健康を祈り、成長を見守ってくださった、父、母、妹、祖父、祖母に感謝いたします。

引用文献

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101, doi: 10.1103/PhysRevLett.119.161101
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., & et al. 2011a, ApJ, 734, 28, doi: 10.1088/ 0004-637X/734/1/28
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Arimoto, M., et al. 2009, Science, 323, 1688, doi: 10.1126/ science.1169101
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, Nature, 462, 331, doi: 10.1038/ nature08574
- —. 2011b, ApJ, 736, 131, doi: 10.1088/0004-637X/736/2/131
- Acharya, B. S., Agudo, I., Samarai, I. A., et al. 2017, Science with the Cherenkov Telescope Array
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., & et al. 2007, A&A, 464, 235, doi: 10.1051/0004-6361:20066381
- Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., & et al. 2007, ApJ, 669, 862, doi: 10.1086/521382
- Aleksić, J., Alvarez, E. A., Antonelli, L. A., et al. 2011, ApJ, 742, 43, doi: 10.1088/ 0004-637X/742/1/43
- Aliu, E., Anderhub, H., Antonelli, L. A., & et al. 2008, Science, 322, 1221, doi: 10.1126/ science.1164718
- Ashcroft, J. 1994, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53, 331, doi: https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90090-6
- Atoyan, A. M., & Aharonian, F. A. 1996, MNRAS, 278, 525, doi: 10.1093/mnras/278.
 2.525
- Band, D., Matteson, J., Ford, L., et al. 1993, ApJ, 413, 281, doi: 10.1086/172995
- Briggs, M. S., Band, D. L., Kippen, R. M., et al. 1999, ApJ, 524, 82, doi: 10.1086/307808
- Cheng, K. S., Ho, C., & Ruderman, M. 1986, ApJ, 300, 522, doi: 10.1086/163830
- Costa, E., Frontera, F., Heise, J., & et al. 1997, Nature, 387, 783, doi: 10.1038/42885

- Daugherty, J. K., & Harding, A. K. 1982, ApJ, 252, 337, doi: 10.1086/159561 -... 1996, ApJ, 458, 278, doi: 10.1086/176811
- Finke, J. D., Razzaque, S., & Dermer, C. D. 2010, ApJ, 712, 238, doi: 10.1088/ 0004-637X/712/1/238
- Fruck, C. 2015, Dissertation, Technische Universität München, München
- Gaensler, B. M., & Slane, P. O. 2006, ARA&A, 44, 17, doi: 10.1146/annurev.astro. 44.051905.092528
- Giordano, F., Naumann-Godo, M., Ballet, J., et al. 2012, ApJ, 744, L2, doi: 10.1088/ 2041-8205/744/1/L2
- Goldreich, P., & Julian, W. H. 1969, ApJ, 157, 869, doi: 10.1086/150119
- H. E. S. S. Collaboration, Abdalla, H., Aharonian, F., et al. 2018, A&A, 620, A66, doi: 10.1051/0004-6361/201732153
- Harding, A. K., Stern, J. V., Dyks, J., & Frackowiak, M. 2008, ApJ, 680, 1378, doi: 10. 1086/588037
- Harrison, F. A., Bloom, J. S., Frail, D. A., et al. 1999, ApJ, 523, L121, doi: 10.1086/ 312282
- Hjorth, J., Sollerman, J., Møller, P., et al. 2003, Nature, 423, 847, doi: 10.1038/ nature01750
- Inoue, S., & Takahara, F. 1996, ApJ, 463, 555, doi: 10.1086/177270
- Inoue, S., Granot, J., O'Brien, P. T., et al. 2013a, Astroparticle Physics, 43, 252, doi: 10. 1016/j.astropartphys.2013.01.004
- Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M. A. R., et al. 2013b, ApJ, 768, 197, doi: 10.1088/ 0004-637X/768/2/197
- Ioka, K. 2007, シリーズ現代の天文学, Vol. 8, ブラックホールと高エネルギー現象, ed. 嶺. 慎. 小山 勝二 (日本評論社), 223–237
- Ishizaki, W., Tanaka, S. J., Asano, K., & Terasawa, T. 2017, ApJ, 838, 142, doi: 10.3847/ 1538-4357/aa679b
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, ApJ, 182, L85, doi: 10.1086/ 181225
- Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., et al. 1995, Nature, 378, 255, doi: 10.1038/ 378255a0
- Lithwick, Y., & Sari, R. 2001, ApJ, 555, 540, doi: 10.1086/321455
- Metzger, M. R., Djorgovski, S. G., Kulkarni, S. R., & et al. 1997, Nature, 387, 878, doi: 10.1038/43132
- Nakamura, K. 2010, Journal of Physics G Nuclear Physics, 37, 075021, doi: 10.1088/
0954-3899/37/7A/075021

Olaizola, A. M. 2015, slides for MAGIC Software School

Piran, T. 1999, Phys. Rep., 314, 575, doi: 10.1016/S0370-1573(98)00127-6

Rees, M. J., & Gunn, J. E. 1974, MNRAS, 167, 1, doi: 10.1093/mnras/167.1.1

Robson, I. 1996, Active galactic nuclei

- Ruderman, M. 1975, in Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 262, Seventh Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, ed. P. G. Bergman, E. J. Fenyves, & L. Motz, 164–180
- Ruderman, M. A., & Sutherland, P. G. 1975, ApJ, 196, 51, doi: 10.1086/153393
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1986, Radiative Processes in Astrophysics, 400
- Shahmoradi, A. 2013a, ApJ, 766, 111, doi: 10.1088/0004-637X/766/2/111
- Shahmoradi, A., & Nemiroff, R. J. 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451, 126, doi: 10.1093/mnras/stv714
- Shemi, A., & Piran, T. 1990, ApJ, 365, L55, doi: 10.1086/185887
- Tanaka, S. J., & Takahara, F. 2010, ApJ, 715, 1248, doi: 10.1088/0004-637X/715/2/ 1248
- van Paradijs, J., Groot, P. J., Galama, T., & et al. 1997, Nature, 386, 686, doi: 10.1038/ 386686a0
- VERITAS Collaboration, Aliu, E., Arlen, T., et al. 2011, Science, 334, 69, doi: 10.1126/ science.1208192
- Voelk, H. J., & Bernloehr, K. 2008, doi: 10.1007/s10686-009-9151-z
- Wakely, S. P., & Horan, D. 2008, International Cosmic Ray Conference, 3, 1341
- Weekes, T. C., Cawley, M. F., Fegan, D. J., et al. 1989, ApJ, 342, 379, doi: 10.1086/ 167599
- Yonetoku, D., Murakami, T., Nakamura, T., et al. 2004, ApJ, 609, 935, doi: 10.1086/ 421285