

GRAINE 2011 年度気球実験：姿勢モニターの解析

神戸大 ○尾崎 圭太, 青木 茂樹, 釜田 啓樹, 鈴木 州, 高橋 覚,
中川 諒, 原 俊雄, 水谷 早希, 水谷 深志, 六條 宏紀
愛知教育大学 児玉 康一
ISAS/JAXA 斎藤 芳隆, 田村 啓輔, 濱田 要, 吉田 哲也
宇都宮大 佐藤 禎宏, 手塚 郁夫
岡山理科大 伊代野 淳
名古屋大 石黒 勝己, 河原 宏晃, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, さこ 隆志,
佐藤 修, 鈴木 和也, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行,
中村 光廣, 丹羽 公雄, 宮西 基明, 森島 邦博, 吉田 純也

1. エマルション望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE

GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) は、数 10MeV から 100GeV の高エネルギーガンマ線帯域において、ガンマ線天体の高分解能観測およびこの帯域で初となる直線偏光観測を目指す気球実験である。

最新のエマルションフィルム(原子核乾板)及び全自動高速飛跡読取装置の開発により、大面積かつ高分解能なエマルションガンマ線望遠鏡が実現可能となった。エマルションの特徴は Fermi-LAT よりも一桁程度優れた角度分解能を有する点である。これを生かして、knee 以下の宇宙線の加速源候補である超新星残骸の空間構造の高分解能観測、及びガンマ線放射が陽子起源か電子起源かを定める上で特に重要な低エネルギー側(200MeV 以下)のエネルギースペクトル測定を行う。これらを実現し、宇宙線起源を解明することが GRAINE 計画の科学的目標の一つである。

2. 姿勢モニター：デイトタイムスターカメラ

天球に対する望遠鏡の姿勢情報を与える姿勢モニターとしてスターカメラを採用している。我々は将来 24 時間以上のフライトを行うことを考えているため、昼夜問わず動作する姿勢モニターが望ましいとして、デイトタイムスターカメラの開発を行った。また姿勢モニターはエマルションの角度分解能(1.4mrad@2GeV)より良い精度で姿勢を決定することが要求される。ここでは、2011 年 6 月に北海道大樹町にて行った気球実験に搭載した姿勢モニターの解析結果を報告する。

図 1 に示すように、昼間の観測では太陽光による空の散乱背景光がバックグラウンドとなるので、短波長の光をカットする red filter を用いた。また、近赤外付近まで高い量子効率を有する CCD カメラを採用した。

2011 年度気球実験に採用した CCD カメラ及びレンズは以下の通りである。

- CCD カメラ：浜松ホトニクス製 C3077-79
- カメラレンズ：Nikon 製 AF Nikkor 85mm F1.4
- レンズフィルター：Schneider Optics 製 B+W 091

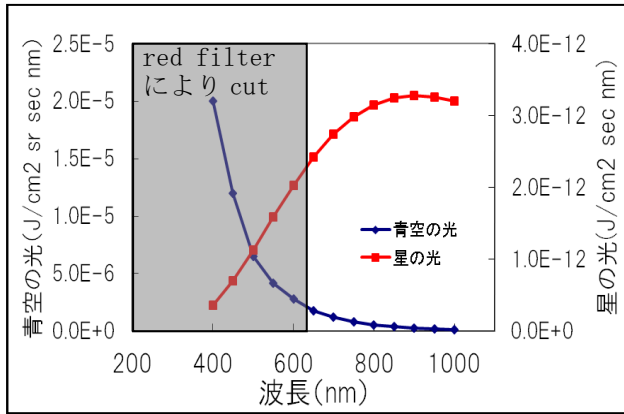


図 1：青空の光[1]および
M 型 3200K の黒体輻射スペクトル



図 2：搭載したスターカメラ

これらの機器におけるカメラの Field of View は 5.9 度×4.5 度，1pixel あたり 0.0093 度×0.0093 度(=0.16mrad)である。露光時間 1/30sec で撮影を行ったときのカメラの予想感度は約 6 等級で，一視野あたりに写る星数の期待値は 3 個であった。

画像データは PC104+規格のボードを用いて 8bit の AD 変換をして 30Hz で取り込み，データはシリコンディスクに保存した。

3. フライトデータ解析

3.1 星の自動抽出およびパターンマッチング

撮影した画像にフィルタリング処理をした後，ある閾値以上の明るさを持つ星 like なピクセルの自動抽出を行った。また，シングルフレームの処理で星がうからなかった場合は，最大 3 フレームの画像積分処理をした。レベルフライト全時間帯にわたって星ピクセルの自動抽出を行った結果を図 3 に示す。レベル高度の途中で別グループによる姿勢制御が行われて視線方向が固定され，不幸にもその方向に検出可能な星が存在しなかったため長時間にわたり星を捉えることが出来なかった。

次に，スターカタログとのパターンマッチングをとりカメラの視線方向の特定を行った。天球に対して仰角は設計値から±5 度，全方位角のカタログデータとパターンマッチングを取った。結果の一例として，レベルフライト時(8 時 10 分 59 秒)におけるスターカメラによる星画像とスターカタログの星分布を図 4 に示す。予想感度通りの星を捉えていることが分かる。

この時刻では，カメラの視線方向は方位角 322.61 度±0.002 度(=0.03mrad)，仰角 52.50 度±0.003 度(=0.05mrad)と決定した。

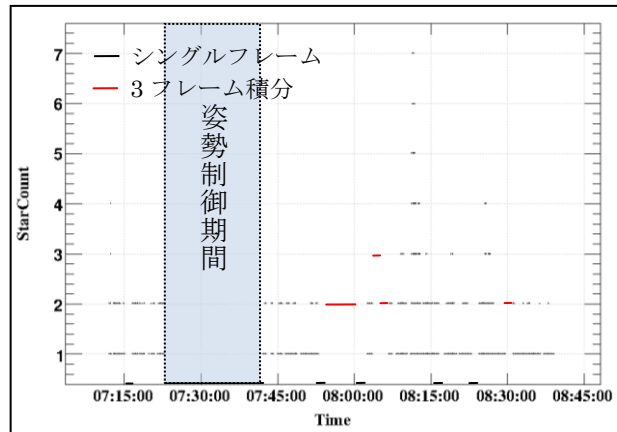
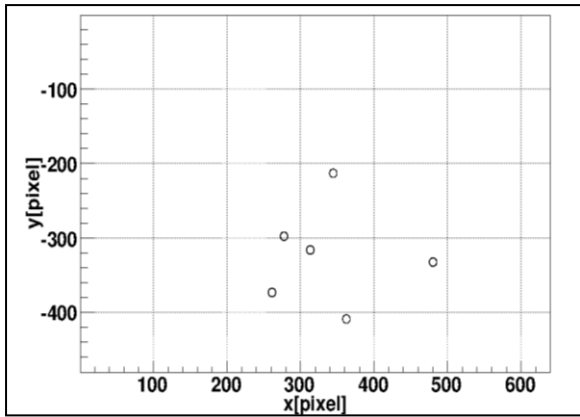
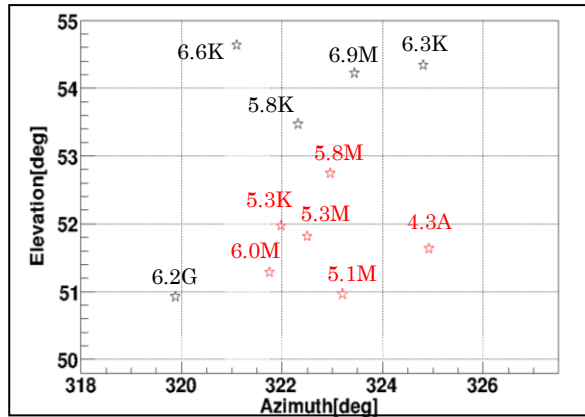


図 3：検出した星数の時間変化
(レベルフライト：7:14～8:40)



(a) 自動抽出した星ピクセルの分布



(b) スターカタログ

図 4 : パターンマッチングの結果の一例

3.2 姿勢解析

星を検出した時間帯はカメラの視線方向の特定が可能である。図 5 にカメラの視線方向及び太陽の方位角の時間変化, 図 6 に仰角の時間変化を示す。また図 7 に 1 分程度の幅で時間軸を拡大した仰角の時間変化を示す。レベル高度に入った直後と後半では振幅は大きく異なるが、どちらも 15 秒程度の周期的な振動が観測された。これは吊り紐の長さ 50m とした場合の単振子の周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \cong 14$ 秒と一致した。

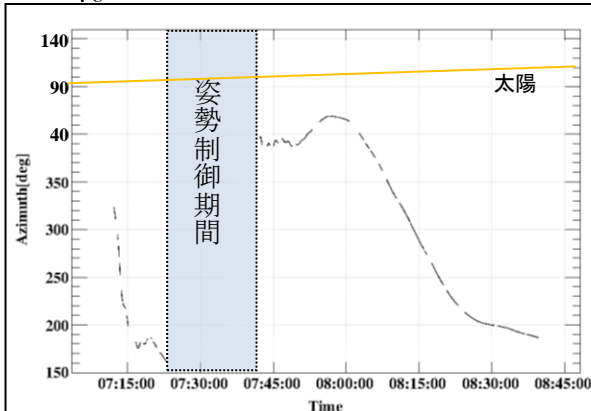


図 5 : 方位角の時間変化

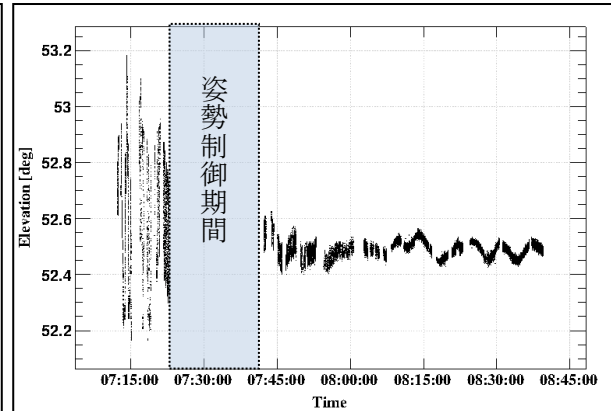
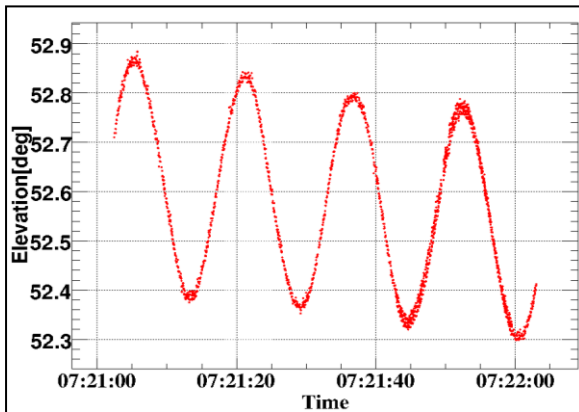
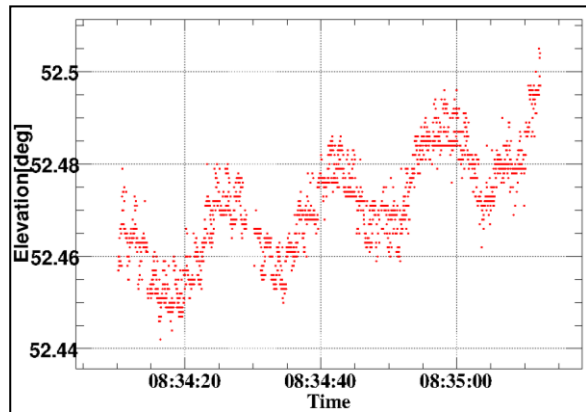


図 6 : 仰角の時間変化



(a) レベル前半(7:21~7:22)時の仰角の変化



(a) レベル後半(8:34~8:35)時の仰角の変化

図 7 : 仰角の時間変化、横軸を拡大

3.3 姿勢の決定精度

星を 3 個以上検出できた時間帯はフィッティングエラーを姿勢の決定精度とすると、姿勢決定精度は 0.1mrad を得た(図 8(a), (b))。検出した星数が 2 個以下で姿勢を決定した値の精度を、3 個で姿勢を決定した値とのズレ量を指標として評価すると max 0.44mrad のズレが生じたが、1mrad という要求値には問題ない精度であった。

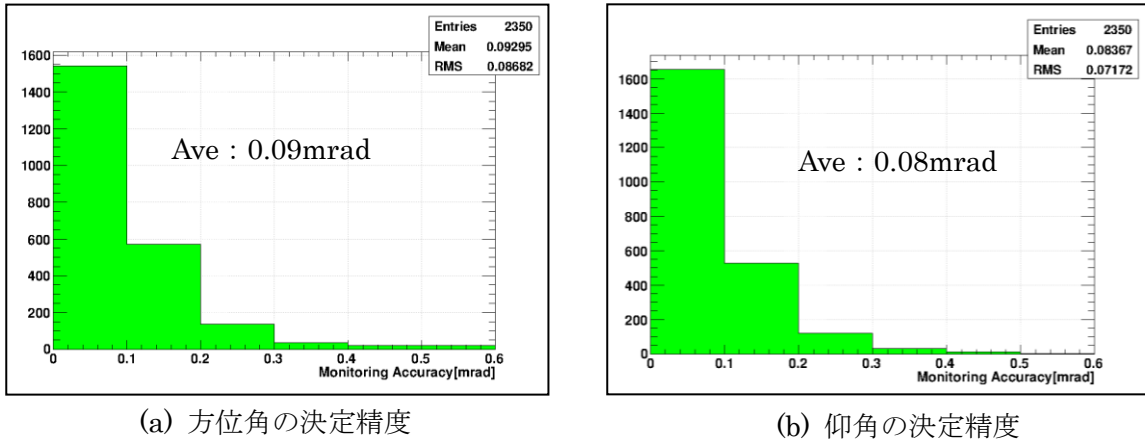


図 8 : 姿勢の決定精度

3.4 ゴンドラの回転速度

ゴンドラの回転速度の分布を図 9 に示す。
本フライトでは±4mrad/sec 程度の速度でゴンドラが回転していたことが分かった。本フライトで多段シフターは時間分解能 0.15sec を実証しており、4mrad/sec の回転速度は我々が目指す 1mrad でのガンマ線天体観測には問題ないことを確認した。

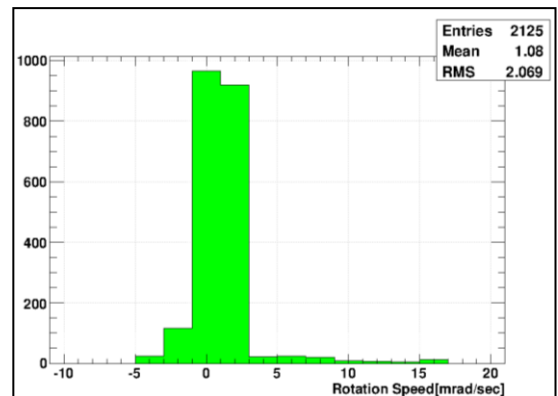


図 9 : ゴンドラの回転速度分布

4. まとめと展望

2011 年度気球実験に搭載した姿勢モニターは期待通りの性能を達成した。太陽が出ている時間帯において予想感度(6 等級)の星を捉えていることを確認し、太陽がカメラの視線方向に最も近づいたとき(方位角差 50 度, 仰角差 10 度)でも感度の低下は見られなかった。フードの設計が不完全であったことによる視野の損失があったため^[2], 1 視野あたりの星数の平均値は 1.3 個と期待値を下回った点が課題である。姿勢決定精度は 0.1mrad を達成し、姿勢モニターとして十分な姿勢決定精度を得ることが出来た。姿勢モニターの稼働率は 74%であり視野の損失が無ければ 82%を達成したと予想される。

2013 年度実施を目指す気球実験では採用する CCD カメラ及びレンズの見直しを図り感度を上げること考えている。また、複数台のスターカメラを異なる方位角で搭載する予定である。

参考文献

- [1] K. L. Dietz et al., 2002, Opt. Eng., 41
- [2] 尾崎 圭太 他, 2011 年度大気球シンポジウム報告