

## GRAINE 2015 年豪州気球実験：姿勢モニターの解析

○尾崎 圭太 (神戸大) and GRAINE collaboration

愛知教育大, ISAS/JAXA, 宇都宮大, 岡山理科大, 神戸大, 名古屋大

### 1. はじめに

電磁波の中で最もエネルギーの高い光であるガンマ線は、宇宙空間における高エネルギー天体（現象）を調べる上で重要な観測手段である。ガンマ線天文学は 2008 年に Fermi 衛星や AGILE 衛星がリードしており、Fermi は 4 年間の観測で 3000 を超えるガンマ線天体を発見している。一方でガンマ線放射天体・現象をさらに理解するためには、高角度分解能や偏光感度を持つ次世代のガンマ線望遠鏡による観測が必要な状況である。

我々は気球搭載エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) を推進している。エマルジョン望遠鏡は Fermi 衛星と比べ桁近く角度分解能を改善し、偏光感度を有することが特徴である。また口径面積  $10\text{m}^2$  を実現して突発発光現象に対する感度を大幅に向上させ、一週間程度の長時間気球フライトを繰り返して高統計観測を行ってガンマ線天体の高分解観測、偏光観測を目指す。

2015 年 5 月にオーストラリア、アリススプリングスにて GRAINE が JAXA 国際気球実験として実施された。本実験は明るいガンマ線天体である Vela パルサーの検出と世界最高の結像性能実証が目的である。ここでは姿勢モニターのフライトデータ解析について報告する。

### 2. 姿勢モニター：デイトイムスターカメラ

気球高度において望遠鏡の天球に対する姿勢情報を得る姿勢モニターとして、我々はスターカメラを採用している。スターカメラへの要求性能は、1) 昼夜問わず動作すること、2) 望遠鏡の角度分解能と比べ桁高い精度で姿勢をモニターすること、である。2015 年気球実験では  $100\text{MeV}$  帯で精度  $10\text{mrad}$  での天体結像を目指すため、 $5\text{mrad}$  以下を姿勢決定精度の要求値とした。図 1 に 2015 年気球実験のゴンドラ荷姿を、表 1 に搭載機器をまとめる。



図 1. GRAINE-2015 ゴンドラ荷姿. 66 cm 長の塩ビ製フードが 3 本取り付けられている。

表 1. 搭載したスターカメラシステム

CCD カメラ	SONY 製	XCG-H280E
読み出し	Gigabit Ethernet, 8 bit	
レンズ	Nikon 製	Nikkor AF 85 mm f/1.4D
カメラ視野	$5.9^\circ \times 4.5^\circ$	
	1 pixel = $0.006121^\circ$ (= 0.107 mrad)	
フィルター	Schneider optics 製	B+W 092
	透過波長 >690 nm	
CPU ボード	Advantech 製	PCM-3363
SSD	Plextor 製	PX-512M5Pro / M6Pro

スターカメラは異なる方向（方位 90 度間隔）に 3 台搭載した。画像のサンプリングレートは Vela パルサーが望遠鏡の視野内にいるとき 30Hz、視野外の場合は 10Hz とし、異なるデータ圧縮をオンラインで処理しオンボードの SSD に保存した。スターカメラとエマルジョン本体とのアライメントは、打ち上げ前に 3 次元測定機（FaroArm）を用いて校正した。フライトデータを蓄積した SSD は実験後速やかに回収された。

### 3. 2015 年気球実験データ解析

#### ・姿勢モニターの動作状況

図 2 にスターカメラ (SC) 3 台の打ち上げ前から観測終了にいたるまでの平均輝度値の時間変化及び撮影画像を示す。SC1, 2 はフライト中に動作を停止しており、それぞれ SSD の不具合、動作プログラムの不具合によるタイマーシャットダウンが原因である。また、昼間の画像の輪郭部で太陽光に起因すると考えられる迷光が写り込んでいた。これはフード軸にずれが生じ、明るい迷光成分を殺しきれなかったことに起因すると考えている。

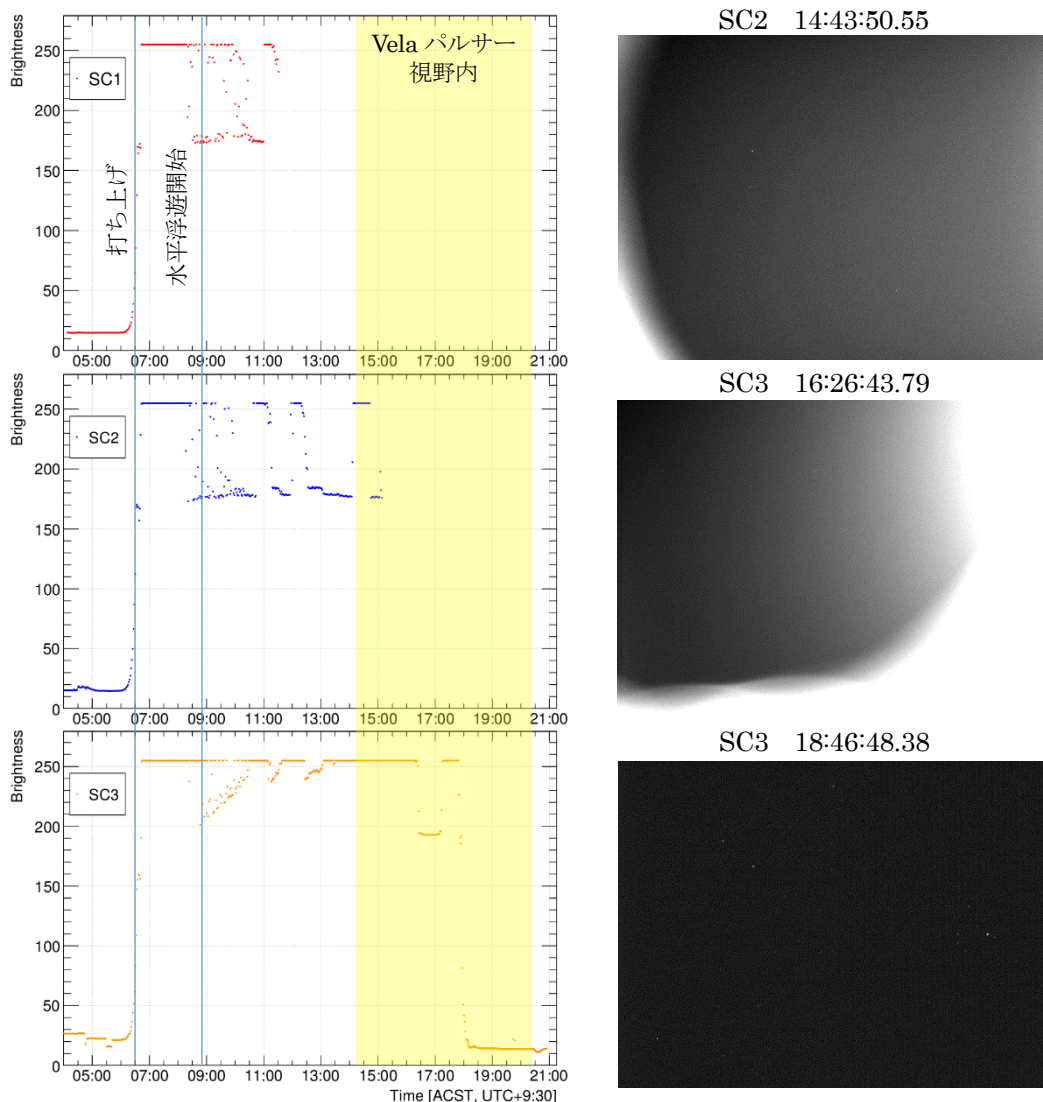


図 2. SC1, 2, 3 の平均輝度値の時間変化及び撮影画像一例

・姿勢解析

撮影画像は画像処理をかけて星ピクセルを抽出し、スターカタログ（ティコカタログ）とのパターンマッチングを取ることでカメラの視線方向（方位角、仰角、（光軸回りの）回転角）を決定した。ここでは Vela パルサーが望遠鏡の視野内に入っていた時間帯について報告する。

図 3 に方位角方向の姿勢変化を示す。15 時 10 分までは SC2 で、それ以降は SC3 で決定した値を重ねてある。時々刻々とゴンドラが回転することで方位角方向の姿勢がしていく様子が観測されている。

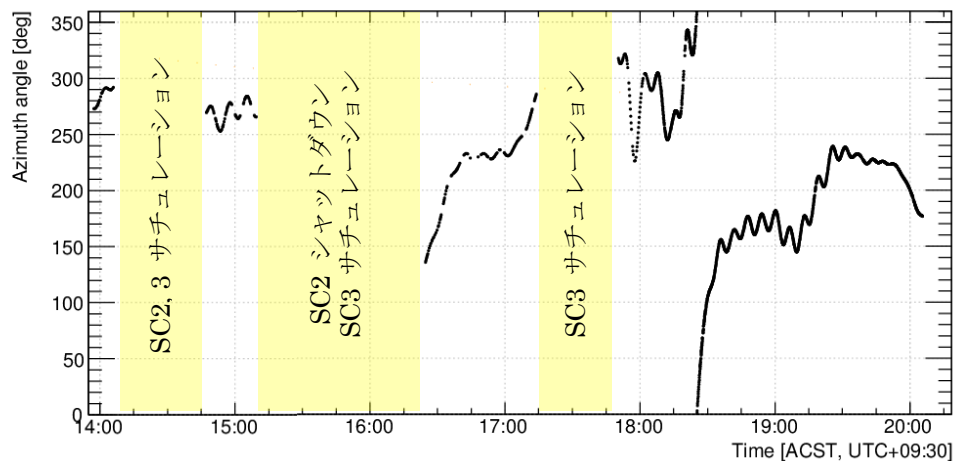


図 3. SC2, 3 で決定した方位角方向の姿勢変化. 網掛けの時間帯は記載の理由で姿勢決定できない。

図 4 に方位角変化を時間微分して得たゴンドラの回転速度分布を示す。GRAINE では姿勢制御はしていないので、天球に対する望遠鏡の姿勢決定精度  $\sigma_{tel}$  は

$$\sigma_{tel} = \text{回転速度} \times \text{時間分解能}$$

となる。全体の 99%の時間帯は 10 mrad/sec 以下であり、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部の時間分解能を 0.5 sec と仮定すると

$$\sigma_{tel} < 10 \text{ [mrad/sec]} \times 0.5 \text{ [sec]} < 5 \text{ [mrad]}$$

となり、2015 年気球実験での要求値と比べ小さな値で姿勢決定可能な見込みを得た。

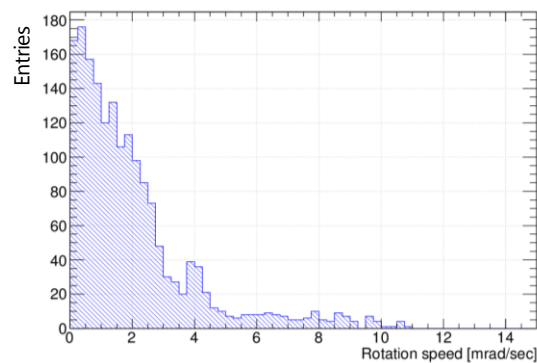


図 4. ゴンドラの回転速度分布

図 5 に仰角方向の姿勢変化を気球の高度変化率と重ねて示す。17 時以前の時間帯で仰角がバタついているのは検出した星が少なく光軸回りの回転角を正しく補正できていないことによるが、その幅は最大 3.5 mrad であり要求される姿勢モニター精度と比べると無視できる。18 時以降は検出星数が増えたことで精度が向上し細かな振動が観測されている。また、高度変化率が大きな時間帯はバラスト投下に起因する。このタイミングでの仰角変化率は最大 0.4 mrad/sec であり、姿勢決定精度に影響はないことが確認された。

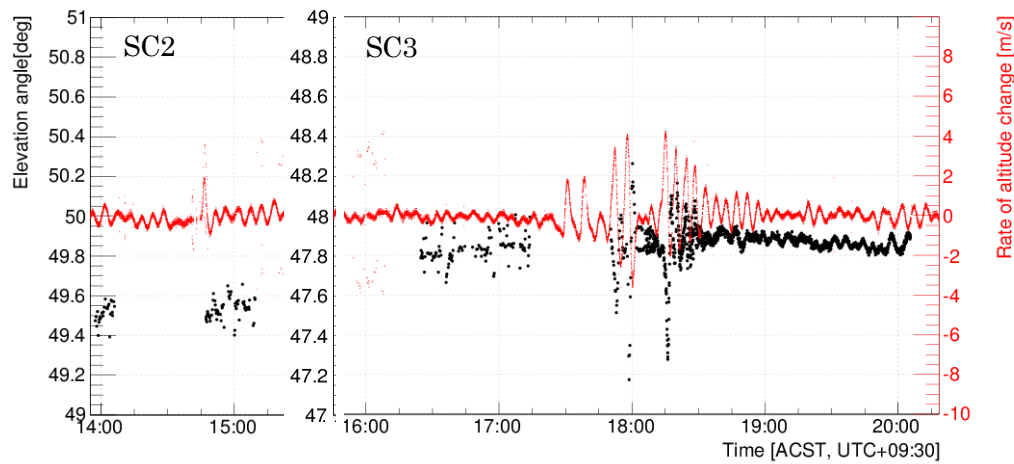


図 5. 仰角の姿勢変化 (黒) 及び気球ゴンドラの高度変化率 (赤)

視野中心の方位角及び回転角の姿勢モニター精度を図 6 に示す。方位角 (及び仰角) 方向は sub-mrad 以下の精度で、回転角方向は mrad の精度であることを確認した。回転方向の精度は検出した星の離角が視野サイズで制限されるため悪化するが要求値は満たしている。

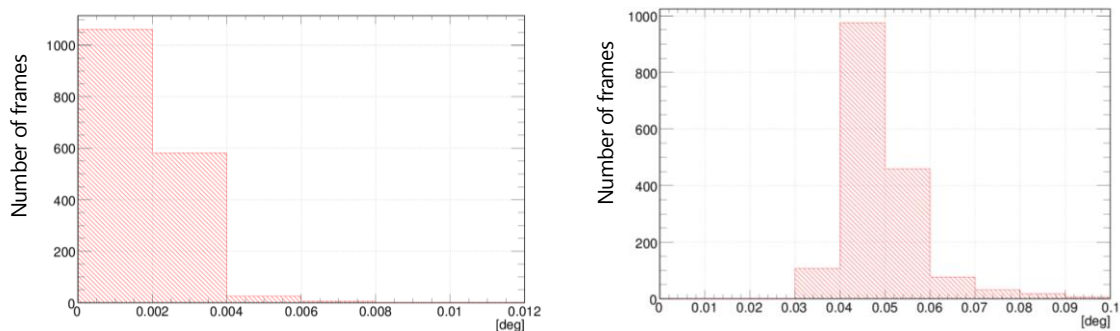


図 6. (左) 方位角と(右) 回転角の姿勢モニター精度の分布

#### 4. まとめと展望

気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE のための姿勢モニターとしてデイトイムスターカメラを開発した。2015 年 5 月にオーストラリア、アリススプリングスにて JAXA 国際気球実験が実施され、搭載したスターカメラのフライトデータを解析した。スターカメラの一部で不具合が生じ、予定通りの観測は行えなかったが、Vela パルサーの観測時間 (5.8 時間) のうち 3.5 時間で姿勢を決定した。スターカメラの姿勢モニター精度は、方位角、仰角方向は sub-mrad 以下、回転方向は mrad の精度であった。また、上空での望遠鏡の姿勢変化率を実測し、最大 10 mrad/sec であった。タイムスタンプ部の時間分解能 0.5 sec が実現されれば、望遠鏡の姿勢決定精度は 5 mrad 以下となり本実験での要求精度を満たす。今後ガンマ線事象の到来方向を、姿勢情報を付与して天球へと再構成していく。また生じた不具合の理解を進め、次期姿勢モニターの開発に活かしていく。

#### 参考文献

青木 茂樹 他, 2004-2012, 2015 年度大気球シンポジウム報告.  
 その他, GRAINE2015 年豪州気球実験に関する報告, 2015 年度大気球シンポジウム報告