

GRAINE 計画：エマルションガンマ線望遠鏡 2023 年豪州気球実験

神戸大学, 愛知教育大学 A, 岡山理科大学 B, 岐阜大学 C, 名古屋大学 D

○高橋 覚, 青木 茂樹, 東 崇史, 岡本 一紘, 小田 美由紀, 加藤 拓海, 鳥野 絢花, 呉坪 健司, 鈴木 州, 長原 翔伍, 中村 崇文, 中村 元哉, 松田 菖汰, 丸嶋 利嗣, 山下 潤, 山下 真優, 米野 翔真, 児玉 康一 A, 秋田 将利 B, 伊代野 淳 B, 杉 侑樹 B, 村上 郁哉 B, 仲澤 和馬 C, 吉本 雅浩 C, 臼田 育矢 D, 諫山 雄大 D, 駒谷 良輔 D, 小松 雅宏 D, 小宮山 将広 D, 佐藤 修 D, 志水 凱 D, 菅波 亜門 D, 杉村 昂 D, 鳥井 茉有 D, 長縄 直崇 D, 中野 敏行 D, 中野 昇 D, 中村 友亮 D, 中村 光廣 D, 中村 悠哉 D, 西尾 晃 D, 林 熙崇 D, 南 英幸 D, 森下 美沙希 D, 森島 邦博 D, 山本 紗矢 D, 六條 宏紀 D

1. はじめに

宇宙ガンマ線観測は、宇宙線物理学、高エネルギー天体物理学、宇宙論、基礎物理学と多岐にわたる波及効果をもたらす。また近年のニュートリノや重力波も併せたマルチメッセンジャー天文学において、ガンマ線は決定的に重要なメッセンジャーを担う。高エネルギーガンマ線が引き起こす電子対創生をエマルションフィルムで捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能およびガンマ線偏光に対する感度が実現できる。我々はエマルションフィルムから成るガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球飛行繰り返しによる宇宙ガンマ線精密観測を目指す (GRAINE 計画)。

これまでに地上における様々な研究開発やテスト実験、2011 年気球実験 (大樹航空宇宙実験場、口径面積 125cm²、総飛行時間 4.3 時間)、2015 年気球実験 (豪州、口径面積 3780cm²、総飛行時間 14.4 時間)、2018 年気球実験 (豪州、口径面積 3780cm²、総飛行時間 17.4 時間) によって、エマルション望遠鏡気球飛行による宇宙ガンマ線観測の実現可能性を拓いてきた。特に 2018 年気球実験では世界最高解像度での Vela パルサーの結像を達成し、世界最高角度分解能を実現するエマルションガンマ線望遠鏡を確立した。これらの経験・実績を基に、今後は口径面積・飛行時間の拡大を図り、科学観測の開始を目指す。コロナウイルス感染症の影響により 2 年の延期、また昨今のヘリウムガス高騰を受けて気球 2 機から 1 機へと変更になったが、2023 年には科学観測の先駆けとなる気球実験 (豪州、口径面積 2.5m²、総飛行時間 27 時間) を達成した。2023 年気球実験では世界最大口径面積となるガンマ線望遠鏡を実現するとともに、Vela パルサーの更なる観測、銀河中心領域の観測、トランジェント天体の観測、その他のガンマ線天体の観測を開始する。

2. 2023 年気球実験

2023 年気球実験に向けて、様々な開発や試験を繰り返し、準備を行った。エマルションフィルムの製造においては、原子核乳剤産体制の構築・機械塗布の導入によってエマルションフィルムの量産を実現した (製造乳剤 1670kg、塗布面積 750m²)。時刻付与機構多段シフターについてはローラー駆動型多段シフターの導入によって大面積化を実現した (計 4 台、合計口径面積 5m²)。姿勢監視スターカメラについてはより低温に強い新スターカメラシステムを構築した。新スターカメラシステムの直前の更新について少し触れておくと、電池の消耗や低温による出力電圧の低下を考慮しカメラ電源電圧のマーヅンを確保するために急遽電源安定化回路 (DC/DC 変換器) の導入を検討し、動作試験をおこなった。2023 年 2 月 6 日から 8 日かけて大気球実験室の恒温恒圧槽での環境試験および電波通信雑音試験を急遽追加した (電波通信雑音試験については現地でも段階を踏みながらおこない、最終的には総合感度試験において問題がないことを確認した)。与圧容器ゴンドラについては大型軽量膜型与圧容器ゴンドラを開発した。与圧容器ゴンドラに多段シフター、スターカメラ、気球実験システムを組み付け、気球放球拠点である豪州アリススプリングスに向けて 12 月半ばに発送した (海上便)。またエマルションフィルムは実験前処理 (リフレッシュ、調湿、真空パック) を施したのち、1 月末に現地に向けて冷蔵輸送で

発送した（航空便）。2月15日からメンバーが現地入りし最終準備を行い、3月14日に準備がほぼ完了した。JAXA 機器との最終かみ合わせ試験や電波通信感度試験を経て、風などの条件が整うのを待った（図1）。



図1：（左図）全機器・全エマルジョンフィルム搭載完了時（断熱材搭載前、与圧容器シェルを閉じる前）。与圧容器ゴンドラにローラー駆動型多段シフター2台を搭載し、そこにコンバーター全20パックを搭載している。全有感面積は2.5m²（1.25m²×2セット）。両半円部に各機器のコントローラ、通信機器、電池を搭載。与圧容器リングの円弧部と直線部の外側には3方位を向いたスターカメラを搭載。長手方向の全長5.7m。（右図）与圧容器シェルを閉じた後、最終かみ合わせ時。3方位を向いている銀色の筒がスターカメラの迷光除けフード。

4月30日に風などの条件が整い、現地時間午前6:32（UTC+9.5）に気球を放球した（図2、3）。放球した気球は上昇し続け、約2時間後に高度36kmに到達し、およそ東向きの風に乗れ、水平浮遊を開始した。「ほ」座パルサーおよび銀河中心領域がエマルジョン望遠鏡の視野を横切る時間帯（15時 - 翌日6時半）を完全にカバーするように飛翔した後、5月1日8:00頃にエマルジョン望遠鏡全システムを停止させた。着地点を注意深く予測した上で8:47に気球を切り離し、パラシュートで緩降下させ、9:25頃にアリススプリングス東南東およそ1100km、ロングリーチ南220kmの地点に着地した。総飛翔時間27時間、うち高度35.4 - 37.2km水平浮遊24時間17分と、これまでのエマルジョン望遠鏡気球実験で最長の気球飛翔を達成した。また放球前

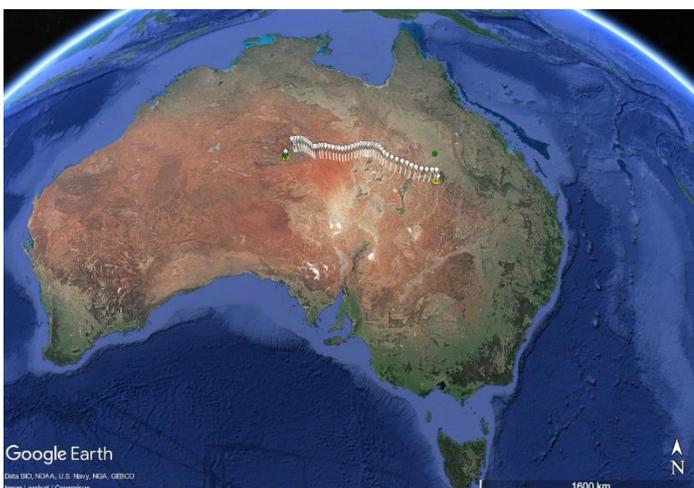
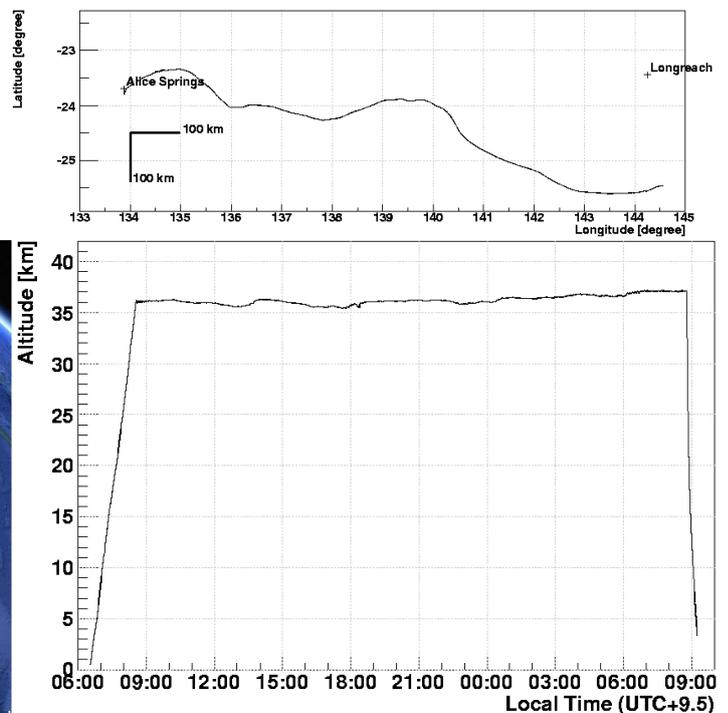


図3：（左図）航跡を示す（白アイコン、30分ごと）。中抜き四角（黄）は放球点（左）、着地点（右）をそれぞれ表す。丸中黒（黄緑）はアリススプリングス（左）とロングリーチ（右）をそれぞれ示す。（右上図）放球から着地までの航跡を緯度・経度で示す。アリススプリングスからロングリーチまでの距離は1060km。（右下図）高度推移を示す。（緯度・経度・高度・時刻情報はJAXA提供）

日にフレアが発生した PKS0402-362 (Fermi LAT Monitor and Transient Information) について、飛翔時の望遠鏡の視野に完全に収まっている (正中 14 時頃、高度 $\sim 80^\circ$)。各機器の動作状況について (図 4)、時刻付与機構多段シフターについては、ローラー駆動型多段シフターの初めてとなる実践投入を果たし、一晩超えて安定した運用および十分な駆動精度を達成した。また姿勢監視スターカメラについては、一晩超えて安定した運用を達成した。また各電池電圧および各機器温度については、一晩超えて問題ない範囲であったことを監視した。また与圧容器については、一晩超えて十分な圧力を保持し続けていることを監視した。総じてエマルジョン望遠鏡を一晩超えて安定した運用を達成した。5 月 1 日 15 時頃にヘリコプターでゴンドラの無事を確認 (ストレージデータを回収) したのち、5 月 2 日にトラックでゴンドラを無事にロングリーチに運び、5 月 4 日に取り外したエマルジョンフィルムを日本に向けて冷蔵輸送で発送した (航空便)。ゴンドラや関連荷物をアリススプリングスでまとめ、5 月 15 日に日本に向けて発送した (海上便)。最後まで残ったメンバーが引き上げ、現地作業をクローズした (最大 11 名、計 828 人・日)。5 月 16 日に日本に返送したエマルジョンフィルムを無事に受け取った。受け取ったエマルジョンフィルムは岐阜大学の現像設備で現像処理をおこない、7 月末までに全てのエマルジョンフィルムの現像処理を無事に完了させた。現在は現像後エマルジョンフィルムの表面析出銀をこすり取り、膨潤処理による膜厚調整を進めつつ、並行して名古屋大学の自動飛跡読取装置 (HTS、HTS2) による飛跡読み出しを進めている。

3. まとめと展望

2023 年気球実験を無事に成し遂げた。飛翔データ解析はまさにこれからだが、今後は口径面積・飛翔時間の拡大を図りながら気球飛翔を繰り返し、科学観測を本格化していければと考えている。

謝辞

2023 年気球実験の達成にあたり関係各方面の方々の協力に感謝します。福家英之実験主任、池田忠作工学担当、山谷昌大工学担当をはじめとする大気球実験室・JAXA・関係業者のメンバーに感謝します。日本国内での準備から現地での最終準備、そして実験本番に至るまで、様々な局面を乗り越え、厳しい制限・制約もあり限られた条件の中で、最後の最後まで実験がうまくいくことを追求して尽力いただき大変心強かったです。その甲斐もあり、当日は風にも恵まれ、限られた飛翔機会を確実にものにすることができました。Ravi Sood、Phill Donohue、Eric Hessling、Trevor Eade、Ashley、Matthew らのニューサウスウェールズ大学をはじめとする現地メンバーに感謝します。現地での最終準備から実験本番、そして最後の撤収に至るまで、様々な場面において強力に支援いただき、現地作業を滞りなく執り行うことができました。本実験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) が提供する大気球飛翔機会を利用したものです。本研究開発は日本学術振興会科学研究費助成事業 (17H06132、21H04472、23H00116、他) の助成のもとで行われたものです。



図 2 : 放球時の様子 (現地時間午前 6:30 頃)。気球の頭部から尾部 (中間発光点) まで約 130m (上空での満膨張時の体積 30 万立方メートル)。ゴンドラ重量約 1.1 トン (バラスト約 0.4 トン)、気球も合わせた総重量約 1.9 トン。

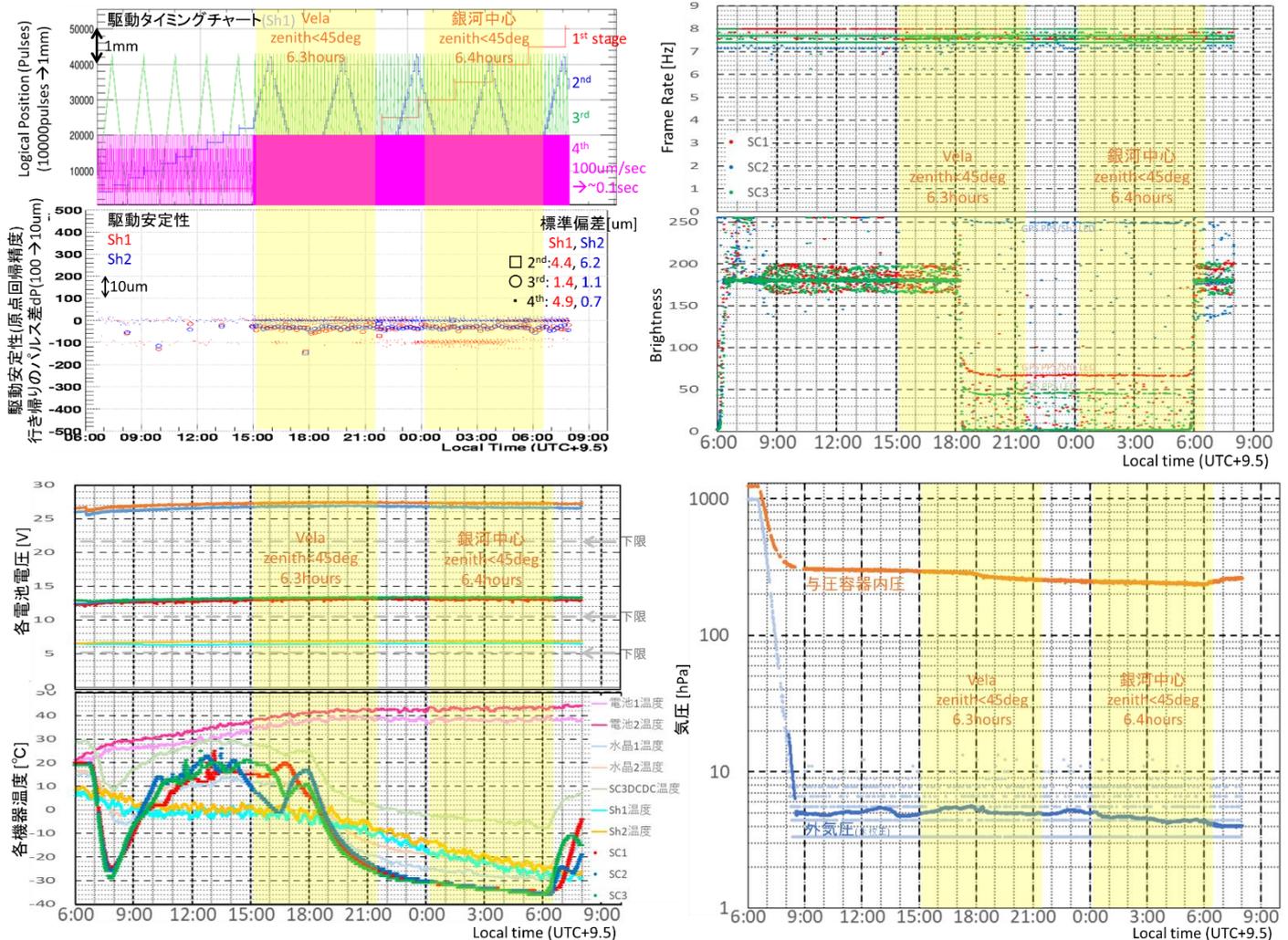


図 4: (左上図) 時刻付与機構多段シフターの駆動タイミングチャート (上) および駆動安定性 (下) を示す。
 (左上図) 姿勢監視スターカメラのフレームレート (上) および輝度推移 (下) を示す。(左下図) 各電池電圧 (上) および各機器温度を示す。(右下図) 与圧容器内・外の圧力推移を示す。

参考文献

GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2023 年度大気球シンポジウム集録. S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 37 (2006) 2120.

S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620 (2010) 192.

H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701 (2013) 127.

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.

K. Ozaki et al., JINST 10 (2015) P12018.

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.

K. Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 833 (2016) 165.

高橋 覚、青木 茂樹、日本物理学会誌 72 巻 10 号(2017) 734.

S. Takahashi, S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 62 (2018) 2945.

K. Yamada et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2017) 063H02.

H. Rokujo, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2018) 063H01.

青木 茂樹、高橋 覚、六條 宏紀、他、RADIOISOTOPES 68 (2019) 877.

H. Rokujo et al., JINST 14 (2019) P09009.

中野 昇、六條 宏紀、日本写真学会誌 84 (2021) 204.

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (submitted).

Y. Nakamura et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2021) 123H02.

M. Oda et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2022) 113H03.