

GRAINE 計画：エマルジョンガンマ線望遠鏡 2023 年気球実験におけるタイムスタンプの初期結果

○小田美由紀¹、青木茂樹¹、岡本一紘¹、高橋寛¹、長原翔伍¹、山下真優¹、山下潤¹

他 GRAINE collaboration^{1,2,3,4,5}

神戸大学¹、愛知教育大学²、岡山理科大学³、岐阜大学⁴、名古屋大学⁵

1.はじめに

宇宙ガンマ線観測は、宇宙線の加速源探索や高エネルギー事象を解明する上で重要な手がかりとなる。私たちはエマルジョンフィルムを用いた気球搭載型望遠鏡による宇宙ガンマ線精密観測計画(GRAINE 計画)を推進している。これまで国内外で気球実験を繰り返しており、2018 年には 14.7 時間の観測によりガンマ線帯域で最も明るく輝く Vela パルサーを世界最高解像度で撮像した。そこで口径面積・フライト時間の拡大による科学観測フェーズを開始し、その先駆けとして 2023 年豪州気球実験を実施した。本講演では、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部である「多段シフター」の運用について述べる。

2. GRAINE 計画と多段シフター

エマルジョンフィルムは写真フィルム的一种であり、荷電粒子の飛跡を銀粒子の連なりとして三次元的に捉えることのできる検出器である。1 μm 以下という高精度で飛跡を記録でき、薄くて大面積化しやすいため、古くから素粒子実験で用いられてきた。しかし現像するまで飛跡を記録し続ける積分型検出器であるため、どの飛跡がいつ来たものかは元来分らない。

そこで GRAINE では飛跡に時間情報を付与する「多段シフター」(図 1)を独自に開発している。多段シフターはエマルジョンフィルムを搭載した複数段をアナログ時計のようにそれぞれ独立な周期で動かすことで、時間に固有な段の位置関係を作り出す機構である。フィルムを現像した後、一つの飛跡を再構成させることで再現される段の位置関係から飛跡の到来時刻を知ることができる。

GRAINE では今までの気球実験において、金属でできたステージ板をガイドレールに沿って駆動させる「ステージ駆動型多段シフター」を用いてきた(図 2)。それぞれの気球実験における多段シフターの実績については「GRAINE collaboration、2004-2019 年度大気球シンポジウム集録」を参照されたい。

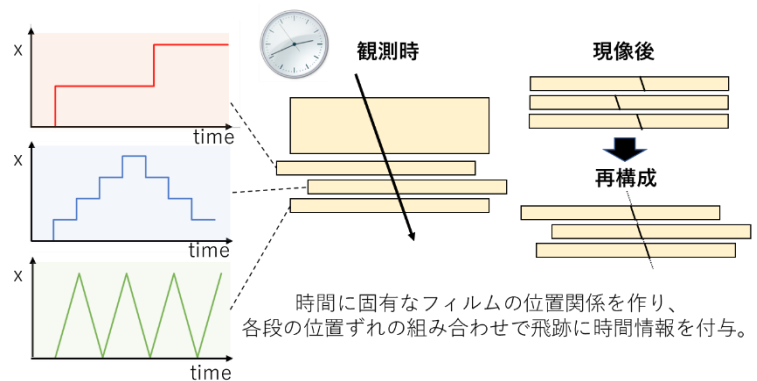


図 1. 多段シフター概念図

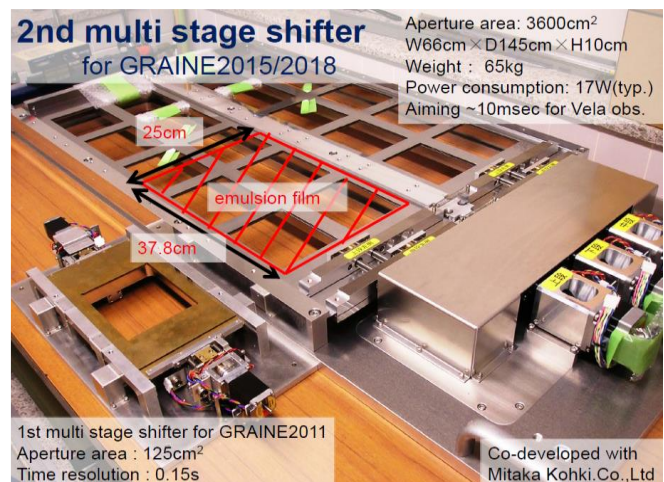


図 2. 2011 年(手前)、2015、2018 年(奥)気球実験に用いたステージ駆動型多段シフター

3. ローラ駆動型多段シフター

エマルジョン望遠鏡を用いた大統計観測を実現するには、多段シフターの大面積化と長時間化が必須である。しかし、金属のガイドレールとステージからなるステージ駆動型は重量が増加しやすく口径面積の拡大化も長時間観測のための増段も難しい。そこで、多段シフターはローラ駆動型へのモデルチェンジを行った。ローラ駆動型多段シフター(図3)はエマルジョンフィルムを保護するフィルムパックの端をローラに固定し巻き取るようにしてシフトさせる。モータの動きをギアで減速して Drive roller を動かし、巻きばねを内蔵した向かいの Tension roller が追従していくことで各段をシフトさせる。フィルムが自重でたわまないように最下面にはフラットで軽いハニカム板を設置し、段間は限界まで接近させて駆動させる。金属のステージやガイドレールがなくなったことにより大幅な軽量化となり、段間の gap が狭まることで飛跡再構成の精度向上も期待されることから、大口径面積、長時間、高時間分解能観測が実現可能となる。

図4にローラ駆動型フライトモデル1号機を示す。ステージ駆動型に対し面積あたりの重量が 1/3 となったことで、3 倍以上の大面積化(1.25 m²)を遂げた。最上段を固定段とした 5 段からなる(上から順に roller0,1,2,3,4)。

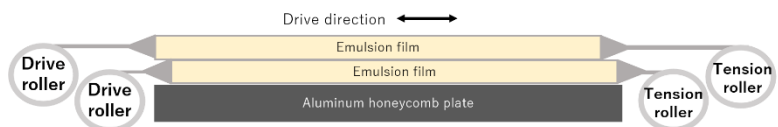


図3. ローラ駆動型多段シフター概念図

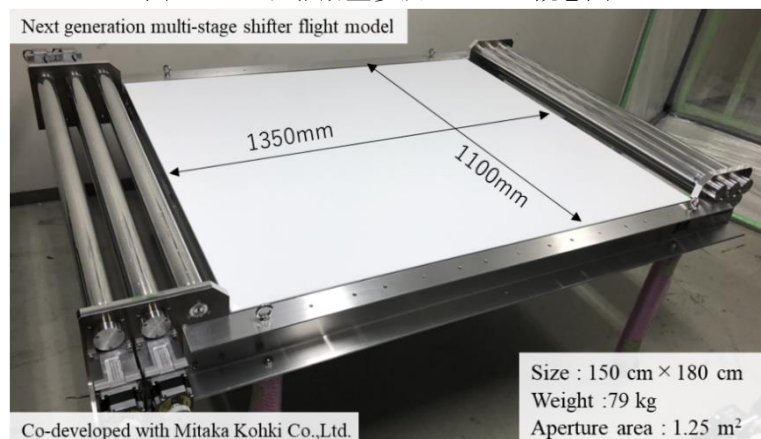


図4. ローラ駆動型多段シフターフライトモデル1号機

筆者は、これまでにローラ駆動型シフターを科学観測実験で導入するための研究開発を進めてきた(GRAINE collaboration 2019-2022 年度大気球シンポジウム集録)。気球実験で要求される性能を地上での宇宙線観測により実証したことで、2023 年豪州気球実験での実践投入を実現した。

4. 2023 年豪州気球実験

エマルジョン望遠鏡のくみ上げは2022年9月に日本国内で開始した。シフター2台とスターカメラ3台を搭載したゴンドラは GRANE 制御システムの作成と、JAXA 機器との接続・ノイズ試験を完了した後、12月に海上便で輸出した。

シフターフィルムパック(図5)は国内で作成し、1月に冷蔵便で空輸した。低物質質量で剛性のある CFRP をエマルジョンフィルムで挟むようにしてパッキングしている。ローラに巻き付ける耳部は、トルク変化による伸びを考慮し 50 μm 厚のステンレスを用いた。アイセロ社のフィクセロン®を介してパック材に熱融着した。摩擦を考慮して、パック間には滑りの良い 50 μm 厚の PTFE シートを用いている。

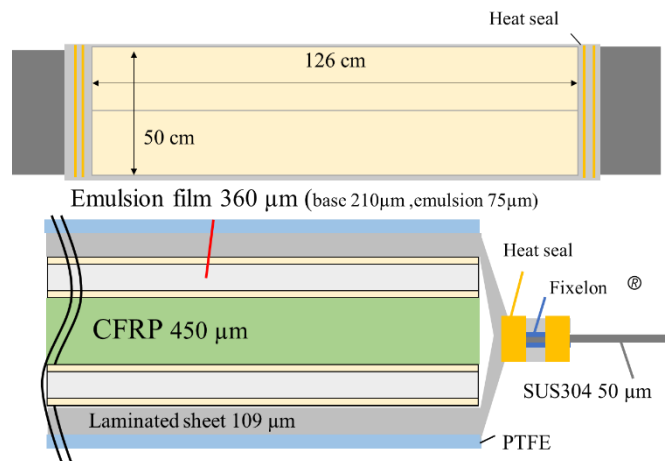


図5. フィルムパックの構成

2月中旬に現地入りした後、輸送後の動作確認やフィルムパックのリークチェックを実施した。全てのフィルムパックに異常がないことを確認し、各段に2枚ずつ計20枚搭載した。その後コンバータフィルムの搭載や、与圧容器のパッキング等を行い3月中旬には感度試験を終えフライトレディを迎えた。ローラ駆動型シフターを2台搭載することで、 2.5 m^2 の大面積望遠鏡を実現した(図6)。



図6. (左)フィルム搭載後のエマルジョン望遠鏡(右)感度試験の様子

5. フライト

フライトは現地時間4月30日6時32分に実施され、放球直後にシフターの観測オペレーションを開始した。図7に試験で用いたフライトオペレーションの一部を示す。roller1は $500\text{ }\mu\text{m}$ のステップ駆動、roller2,3は $200\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ step}$ のステップ駆動、roller4は 1.5 mm の連続駆動($100\text{ }\mu\text{m/s}$ or $10\text{ }\mu\text{m/s}$)である。地上から送るコマンドで最下段の速度を切り替えることができ、飛跡再構成精度を $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の場合1sもしくは 0.1 s の時間分解能を獲できる。 1 s の時間分解能で天体結像は十分可能であるが、高解像度結像やパルサーの位相分解などを見据えて 0.1 s の時間分解能オペレーションも用いた。気球は放球後2時間で高度 36 km に達し、24時間17分のレベルフライトを経てシフターオペレーションを終了、翌日9時25分にロングリーチ南 220 km 地点に着地した。

図8にフライト全体でのシフターオペレーションを示す。

Velaが視野内に入る直前に最下段の速度を切り替えた。各roller各往復運動における往路と復路のモータパルス差をモニタリングし、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の精度で安定駆動していたことを確認した。Velaと銀河中心を視野内に収めたGRAINE史上最長の観測を達成した。回収後、フライトフィルムはすぐに日本に冷蔵輸送され、6月下旬に岐阜大学にて現像を行った。データ読み出しが進行中である。

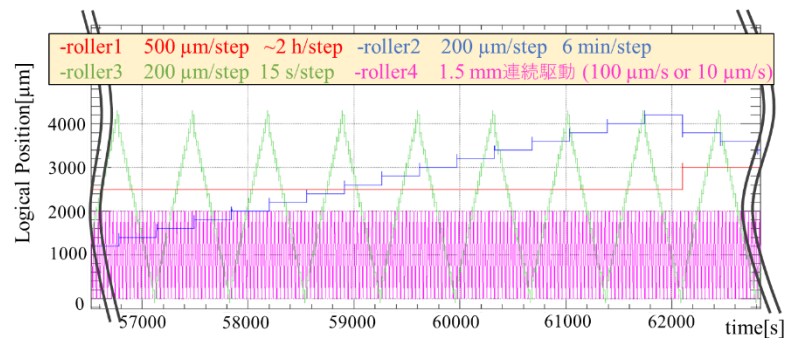


図7. フライトオペレーション詳細

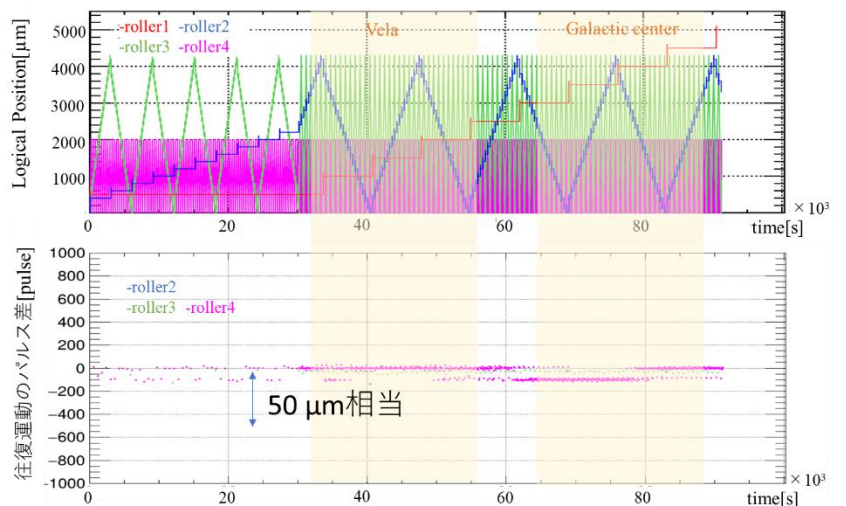


図8. (上)フライト全体でのオペレーション

(下)往復運動のパルス差(10 pulse が $1\text{ }\mu\text{m}$ に相当する)

6. フライトデータ初期結果

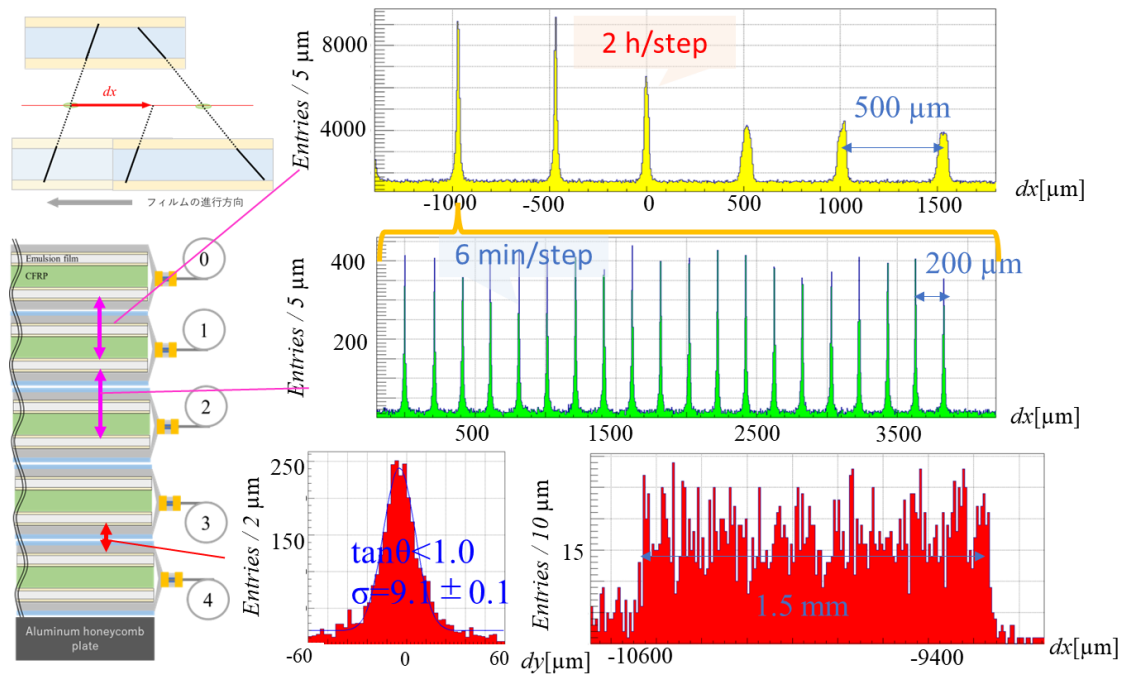


図 9.一部のフライトデータ(1%)での飛跡再構成

一部の面積(1%)での飛跡再構成を行った結果を図9に示す。上から順に2段ずつ再構成を行い、各飛跡の下流フィルム位置-上流フィルム位置(フィルムの進行方向を x 軸とする)の分布を求めた。roller1 と 2 のステップ駆動に相当する 500 μm と 200 μm 間隔の飛跡集団が確認できる。それぞれ2時間、6分間の時間分離である。同様に下流までつなげていき最終段では、連続駆動に相当する帯状の飛跡集団を確認した。フィルムの駆動方向とは鉛直の y 方向での位置ずれ分布においては正規分布での Fitting により飛跡再構成精度 9 μm を獲得した。100 $\mu\text{m}/\text{s}$ で動作をしていたことから、時間分解能にして 9 $[\mu\text{m}]/100 [\mu\text{m}/\text{s}] = \sim 0.1 [\text{s}]$ を達成しうる。オペレーションは正常駆動していたと判断できる。飛跡は一つずつ到来時刻付与を行い(図10)、現在ハドロンジェットなどの同時発生イベントを用いた時間分解能評価を進めている。

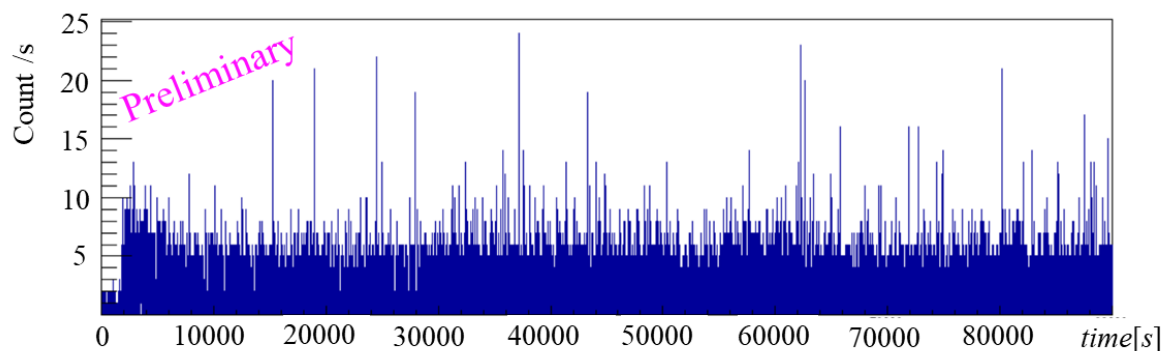


図 10.再構成された飛跡のカウントレート

6. まとめと展望

ローラ駆動型多段シフターはエマルジョン望遠鏡での大面積、長時間、高時間分解能観測を実現する。初の実践運用となった2023年豪州気球実験では、2.5 m^2 の大面積望遠鏡による24時間17分の長時間観測を達成した。現在フライトデータの解析を進めており一部のデータでシフターの正常動作を確認するとともに、天体の高解像度撮像に十分な時間分解能を実証しつつある。