

GRAINE 計画：次期気球実験に向けた新型多段シフターのフィルム搭載試験

○小田美由紀¹、青木茂樹¹、東崇史¹、加藤拓海¹、高橋覚¹、長原翔伍¹、山下真優¹、
他 GRAINE collaboration^{1,2,3,4,5}
神戸大学¹、愛知教育大学²、ISAS/JAXA³、岡山理科大学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。私たちはエマルシ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3回の気球実験を行っており、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。そこで次期気球実験では、口径面積・フライト時間の拡大による本格的な科学観測の開始を目指しており、2023年気球実験において口径面積2.5m²・フライト時間1日程度の気球実験2回を予定している。

2. GRAINE 計画と多段シフター

エマルシ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。1μm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分からない。

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シ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、ステンレスでできたステージ板を金属の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。

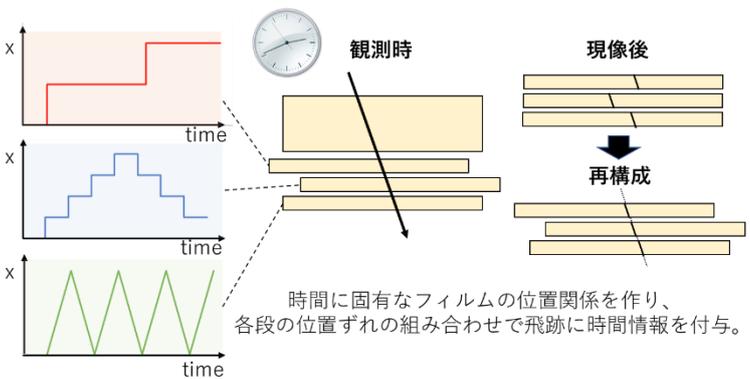


図1. 多段シフター概念図

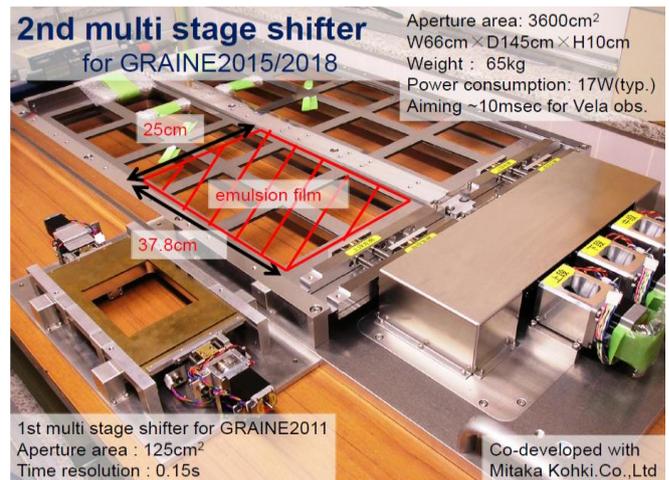


図2. 2011年(手前)、2015、2018年(奥)気球実験に用いたステージ駆動型多段シフター

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科学観測において大統計観測を実現するために、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い構造であるため、容易に重量オーバーとなってしまう。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。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。

筆者は、ローラ駆動型シフターの気球実験での運用を目指した研究開発を進めている。これまでにプロトタイプとフライトモデル1号機(図4)を用いた動作試験によって、ローラ駆動型の原理実証とオペレーション方法の確立を進めてきた。それぞれの動作試験については

「GRAINE collaboration 2019-2020 年度大気球シンポジウム集録」を参照されたい。

現在、ローラ駆動型シフター初の到来時刻付与を目指し、部分的にエマルジョンフィルムを搭載した動作試験を実施し、飛跡再構成を進めている。本講演では、そのフィルム搭載試験に向けた開発と、メカニカルな駆動精度、飛跡再構成の初期結果について報告する。

4. フィルムパック開発

フライトモデル1号機は、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倍以上の大面積化を遂げている。そのため、搭載するフィルムパックも大面積化を行っており、その作成には最大1m×1.5mのパッキングが可能な大型真空包装機を用いた。今回は、ハンドリングの観点から50cm×1.25mのフィルムパックを作成し、各段に2枚ずつ搭載して動作試験を行った。

図5にフィルムパックの構成を示す。低物質質量で剛性のあるCFRPをエマルジョンフィルムの代わりとなる塩ビのシートで挟むようにしてパッキングを行う。両側のローラに巻き付ける耳部は、これまでの動作試験により剛性の高いものが好まれることが分かったため、50μm厚のステンレスを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。フィルム搭載試験では、塩ビシートの3箇所をくりぬき10cm×12.5cmのエマルジョンフィルムをはめ込んだ。

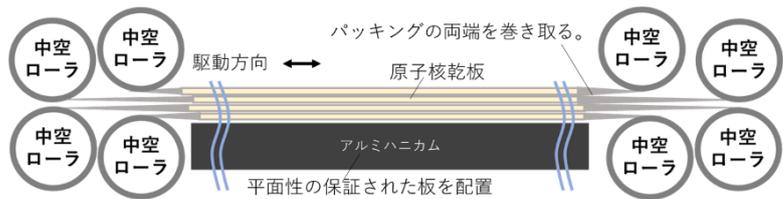


図3. ローラ駆動型多段シフター概念図

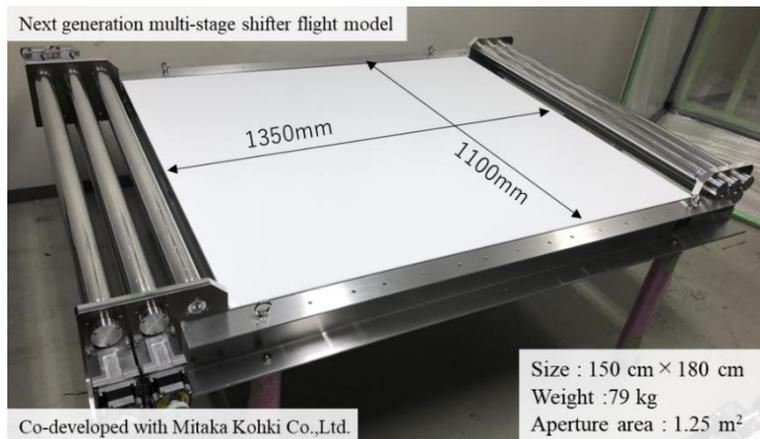


図4. ローラ駆動型多段シフターフライトモデル1号機



図5. フィルムパックの構成

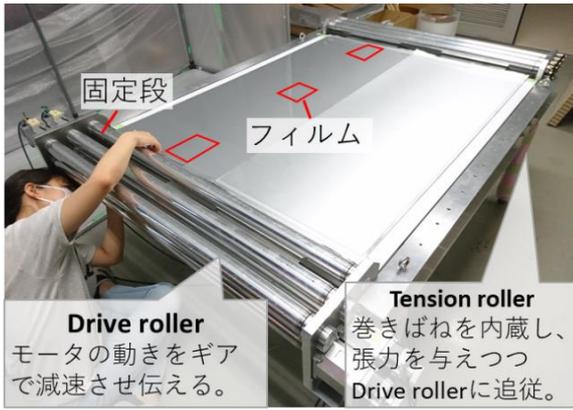


図 6. 動作試験の様子

5. フィルム搭載試験

図 6 に動作試験の様子を示す。モータの動きをギアで減速して伝達させることで 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段をシフトさせる。最上段はモータのない固定段であり、下に向かって順に roller1,2,3,4 とした。エマルションフィルムは各段、赤枠で示す場所に搭載している。これまでの動作試験で摩擦が駆動精度に影響を与えることが分かっていたため、摩擦低減のために各段間に滑りの良い 50 μ m 厚の PTFE シートを挿入した。図 5 に示すようにパックの上面にのみフィルムを配置しているため、フィルム間 gap の設計値は CFRP、パック材、塩ビシート、PTFE を含めた 1163 μ m となっている。

図 7 に動作試験のオペレーションの一部を示す。GRAINE2018 のオペレーションを模擬しており、roller1,2 は 200 μ m のステップ駆動、roller3 は 1.5 mm の連続駆動(10 μ m/s)である。この他、高時間分解能獲得に向け、更に 100 μ m/s の連続駆動を roller4 に取り入れたオペレーションも実施した。図 8 には、図 7 のオペレーションでのメカニカルな駆動精度を示す。エンコーダを各 Tension roller の軸にカップリングして、約 15 秒ごとに回転角を測定した。ステップ駆動では、各 step において待機中の位置の標準偏差を求めて静止精度とした。左上に固定段(約 5 時間/step)、右上に 1 番 roller(約 50 分/step)、左下に 2 番 roller(約 150 秒/step)の静止精度を進行方向ごとに分けて示している。連測駆動については、1 番 roller の 1step あたり(約 50 分、図 7 の網掛け部)での再現性を評価した。進行方向ごとに各位置で 10 stroke 分を重ね合わせた標準偏差を再現性とした。静止精度も再現性も GRAINE2018 の飛跡再構成精度 5 μ m を満たしており、飛跡再構成による評価が行えると考えられる。

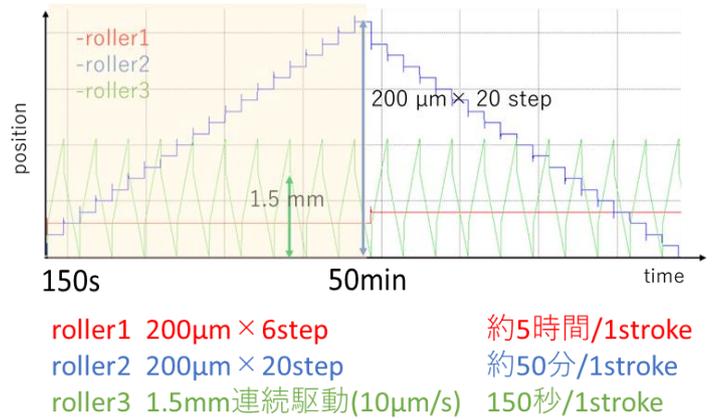


図 7. オペレーション

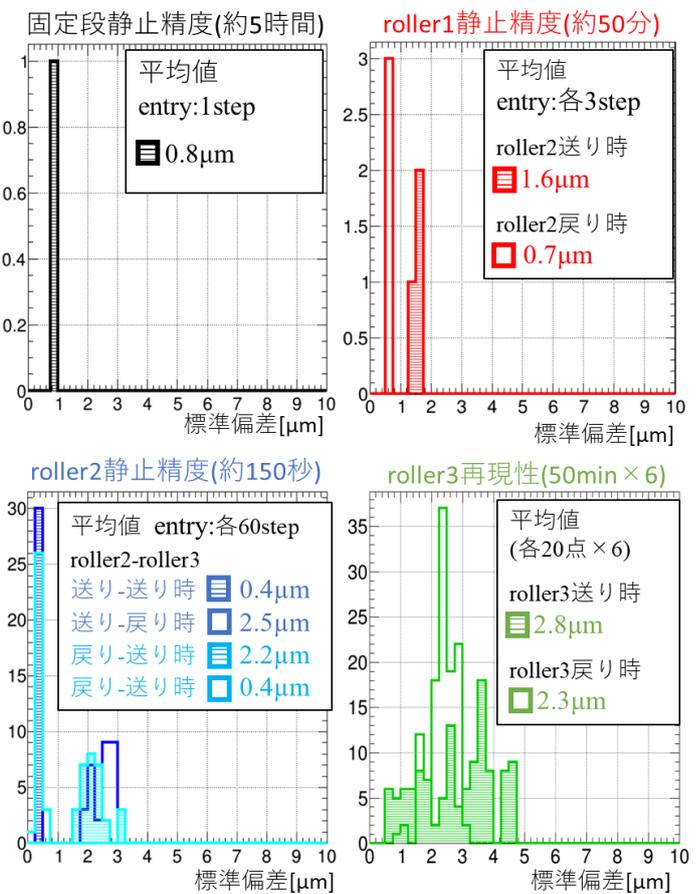


図 8. フィルム搭載試験のメカニカルな静止精度(左上: 固定段, 右上:roller1, 左下:roller2)、駆動再現性(右下)

6. 飛跡再構成精度とフィルム間距離評価

搭載したフィルムは現像した後、名古屋大学の自動飛跡読み取り装置(HTS)でスキャンを行った。現在、宇宙線飛跡を用いた時間分解能評価に向けた解析を進めている。まず気球打ち上げ準備や風待ち等を想定した待機状態での再構成評価を行った。上記のオペレーションとは異なる位置状態で、フィルムパック搭載後直後から8時間その場所で停止させた。メカニカルな静止精度(約8時間)は2 μm であった。

パック中心のフィルムにおいて、固定段-roller1間であつた飛跡の再構成精度とフィルム間距離を図9に示す。ローラの駆動方向のずれをdx(左)、それと直交する方向をdy(中)としている。ガウス関数でFittingしたところ、dxで5.8 μm 、dyで5.0 μm の飛跡再構成精度を得た。フィルム間距離については、設計値(1163 μm)からのずれを示す(右)。設計値から100 μm 以内のずれに収まっていることが分かる。今回は、パックの上面にのみフィルムを搭載しているが、本番では下面にもフィルムを搭載するため、段間距離がパック材(109 μm)とPTFEシート(50 μm)分のみになることを考慮すると、最終的に400 μm 以下の段間距離が実現可能になる。つまり、ローラ駆動型導入による段間飛跡外挿距離の削減で、2018年実験に比べ3倍程度の再構成精度向上が期待できる。

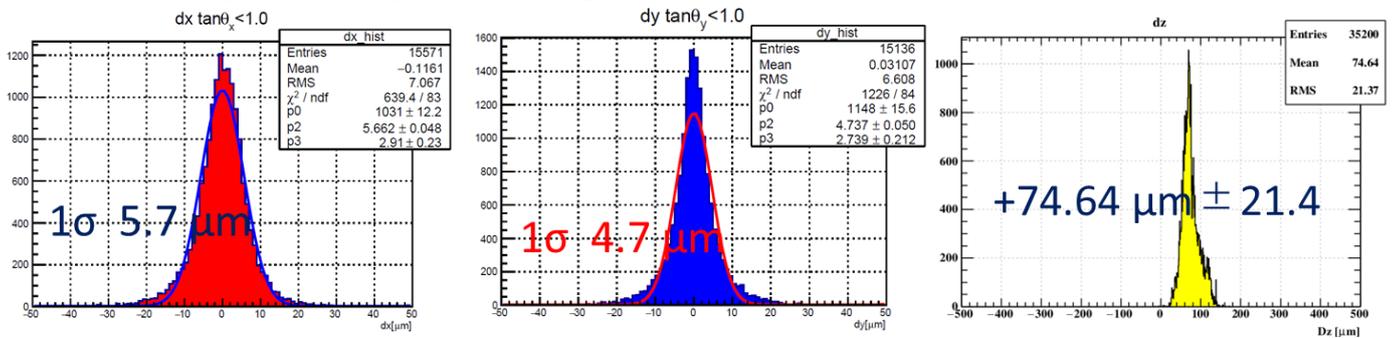


図9. パック中心フィルム、固定段-roller1間での飛跡再構成精度(左:ローラ駆動方向(dx)、中:ローラ軸方向と(dy))と、フィルム間 gap の設計値(1163 μm)からのずれ(右)

図10には、待機状態での位置ずれを0としたときの、飛跡の位置ずれ分布を示す。roller1のステップ間隔に相当する200 μm ピッチのピークが見えており、固定段-roller1間つなぎによって、飛跡の分離が可能であることが分かる。

6. まとめと展望

GRAINE次期気球実験では2023年に口径面積・フライト時間の拡大による本格的な科学観測の開始を予定している。大口径面積、長時間、高時間分解能観測の実現に向けて多段シフターはローラ駆動型へとモデルチェンジを行い、気球実験導入に向けた研究開発を進めている。小判フィルムを搭載した動作試験では、GRAINE2018飛跡再構成精度を満たすメカニカルな駆動精度を確認するとともにローラ駆動型初の飛跡再構成を達成した。また待機用のオペレーションにて、フィルム間の距離が設計値から100 μm 以内に収まっていることを確認し、ローラ駆動型導入による飛跡再構成精度向上の可能性を示した。今後、全フィルム、試験時間で再構成を進めていき、ローラ駆動型初の時間分解能評価を行っていく。

参考文献 GRAINE collaboration 2004-2021 年度大気球シンポジウム報告

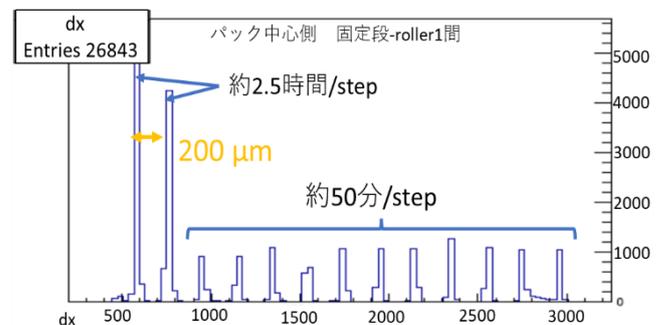


図10. パック中心フィルム、固定段-roller1間、位置ずれ分布