

## GRAINE 計画 :

### 次期気球実験に向けたエマルジョン望遠鏡タイムスタンパーの準備状況

○小田美由紀<sup>1</sup>、青木茂樹<sup>1</sup>、岡本一紘<sup>1</sup>、加藤拓海<sup>1</sup>、高橋覚<sup>1</sup>、長原翔伍<sup>1</sup>、山下真優<sup>1</sup>、米野翔真<sup>1</sup>  
 他 GRAINE collaboration<sup>1,2,3,4,5</sup>

神戸大学<sup>1</sup>、愛知教育大学<sup>2</sup>、岡山理科大学<sup>3</sup>、岐阜大学<sup>4</sup>、名古屋大学<sup>5</sup>

#### 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 2.5m<sup>2</sup>・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。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。

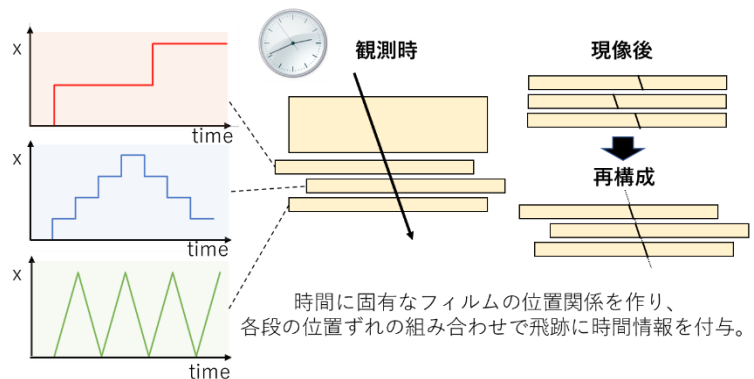


図1. 多段シフター概念図

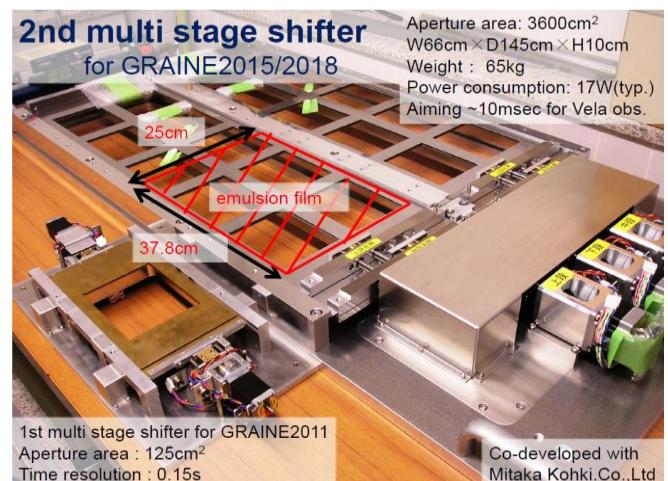


図2. 2011年(手前)、2015、2018年(奥)気球実験に用いたステージ駆動型多段シフター

### 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、ローラ駆動型のオペレーション方法の確立と小片フィルム搭載試験を進めてきた。これまでの動作試験については

「GRAINE collaboration 2019-2021 年度大気球シンポジウム集録」を参照されたい。

現在、2023年気球実験での運用に向けて、恒温槽を用いた環境試験や、ゴンドラ実装を進めている。

### 4. フィルムパック

ローラ駆動型フライトモデルは、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。各段は、Drive roller と Tension roller の対からなり、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。最上段は固定段であり、計5段ある(上から順に roller0,1,2,3,4)。

前回実験の3倍以上となる 50 cm×1.25 m のフィルムパックを大型真空包装機で

作成し、各段に2枚ずつ搭載した。図5にフィルムパックの構成を示す。低物質量で剛性のある 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。

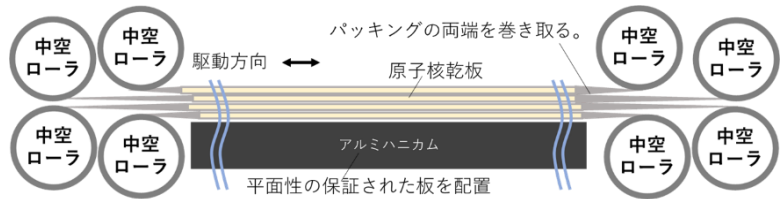


図3. ローラ駆動型多段シフター概念図

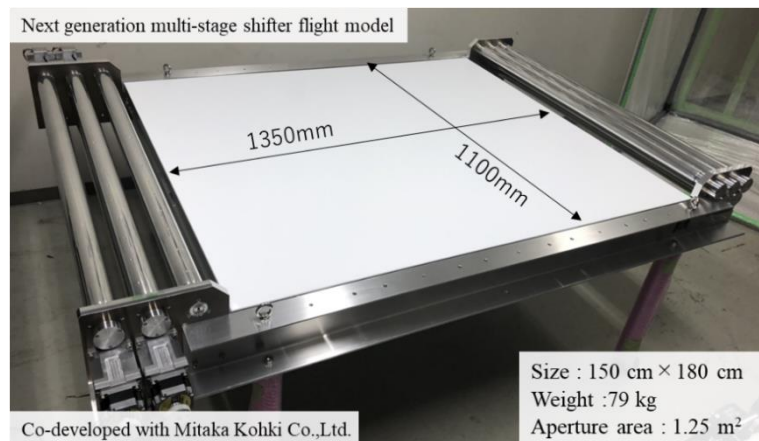


図4. ローラ駆動型多段シフターフライトモデル1号機

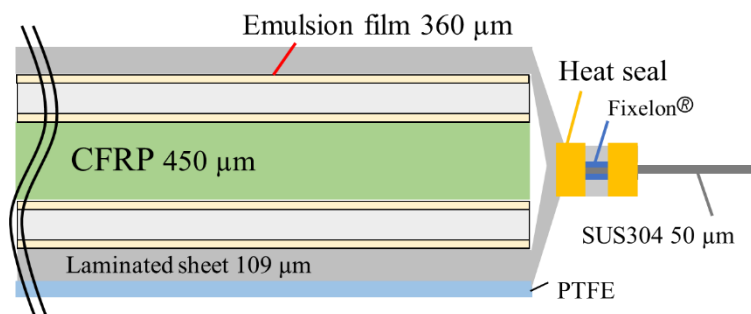


図5. フィルムパックの構成

### 5. 環境試験

気球実験環境下での動作を確認するため、JAXA 大気球実験室や長野県飯田産業センターの恒温槽にて、環境試験を行った。2023 年気球実験で使用する全4台のシフターのメカニカルな精度を確認するとともに、小片フィルム(10 cm×12.5 cm)搭載試験や大面積フィルム(25 cm ×1.25 m)搭載試験を実施した。

図 6 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 μm のステップ駆動、roller2,3 は 200 μm×20 step のステップ駆動、roller4 は 1.5 mm の連続駆動(100 μm/s)である。エンコーダで各 Tension roller の回転角を測定した。

図 7 に恒温槽内の温度変化と各 roller の論理位置との差を示す。前回気球実験よりも 2 倍以上に急激な温度変化をつけた。各 roller の位置はオペレーションによって大きく異なるが、論理位置との差で見ると、温度に対し同様に変化することが分かる。図 9 に roller2 の roller1 に対する相対位置の静止精度と roller4 の roller3 に対する相対位置の再現性を示す。各 step で静止中(~6 分)の標準偏差を求めて静止精度とし、各停止位置において 10stroke 分(~6 分)を重ね合わせた際の標準偏差を再現性とした。静止精度、再現性ともに、フィルム搭載試験での飛跡再構成精度(後述)を満たす 8 μm 以内を達成した。

### 6. フィルム搭載試験

常温常圧下や環境試験下で小片フィルム搭載試験を行い、地上に降り注ぐ宇宙線を用いてローラ駆動型の飛跡再構成精度を評価した。

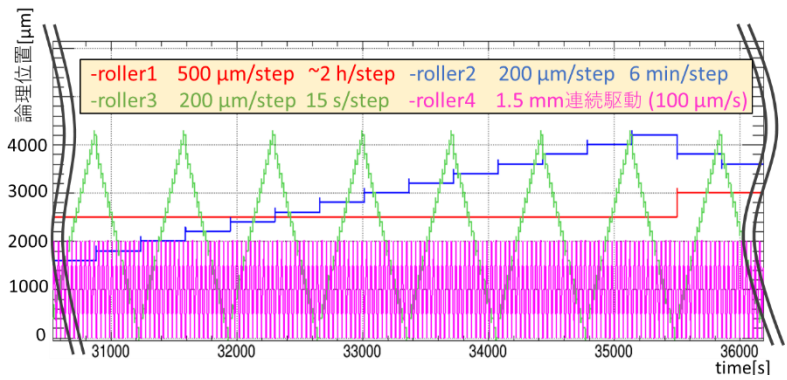


図 6. フライトオペレーション

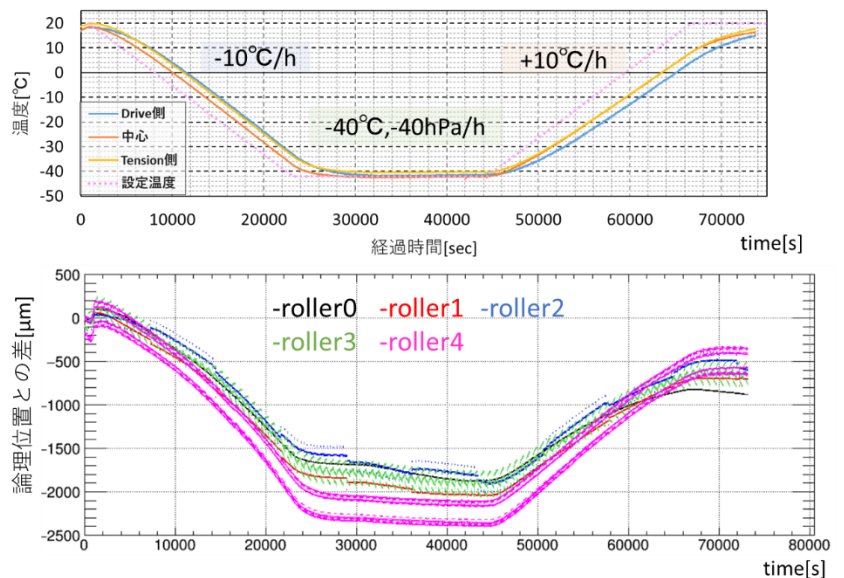


図 7. 恒温槽内の温度変化(上)、各 roller の論理位置との差(下)

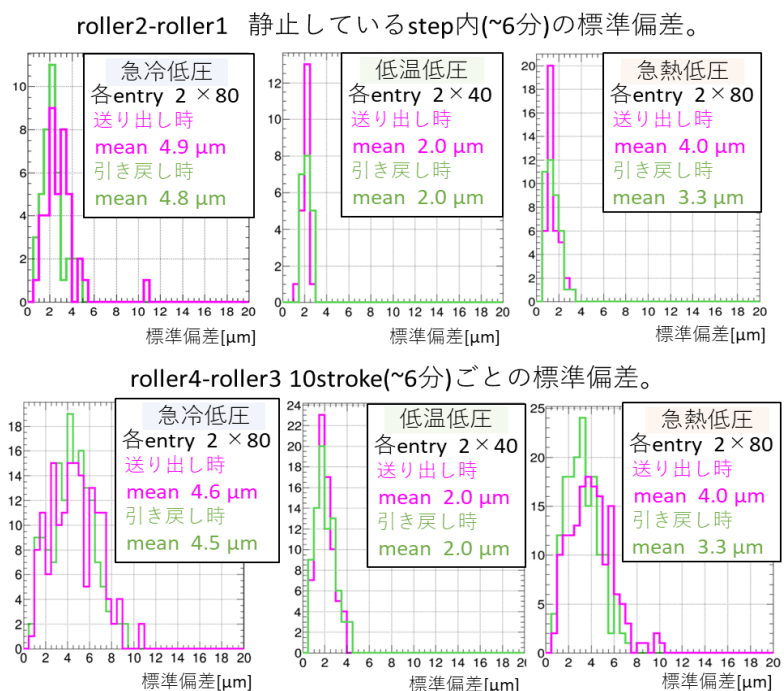


図 8. roller2-roller1 の各 step 内静止精度(上)と roller4-roller3 の 10stroke 分の再現性(下)

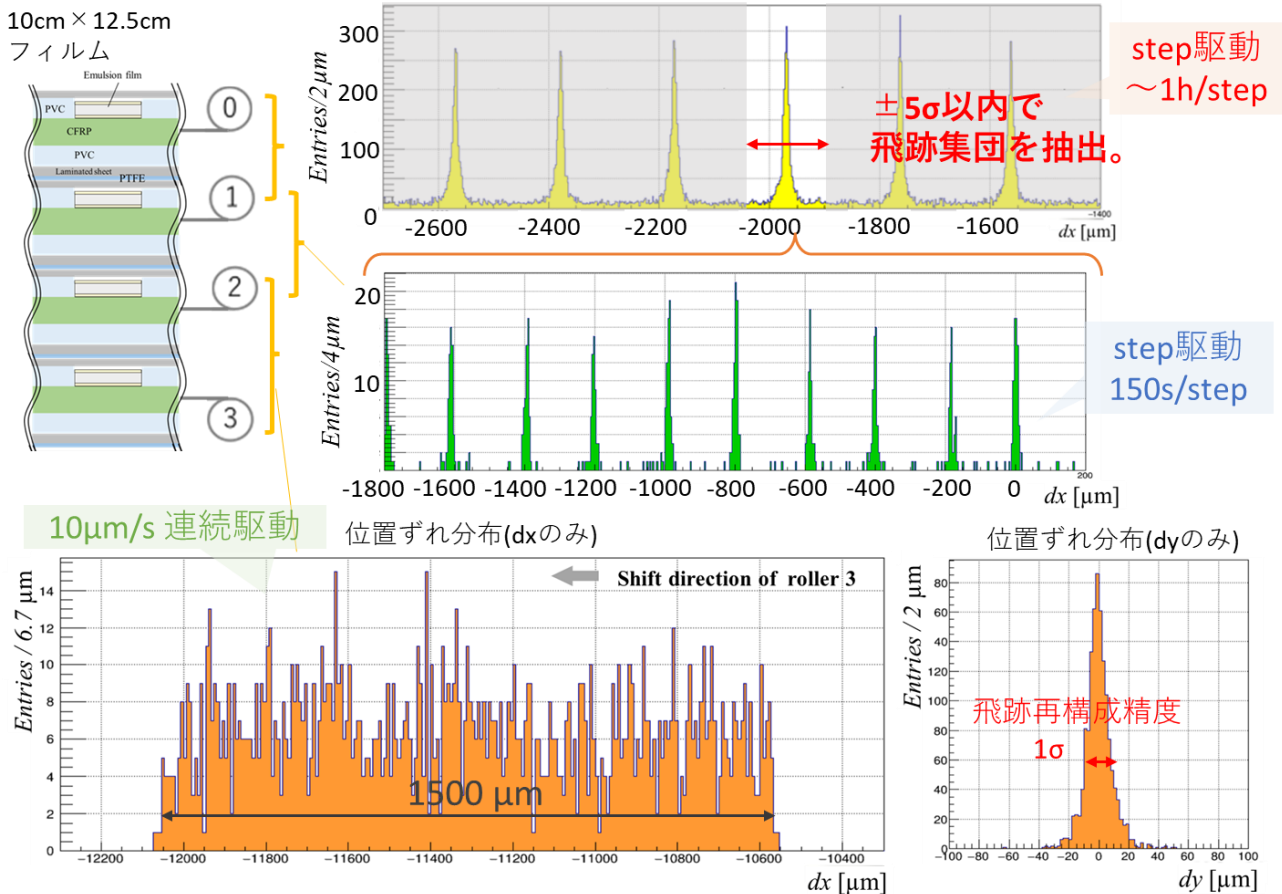


図 9.常温常圧環境下での小片フィルム搭載試験による飛跡再構成

図 9 に常温常圧試験下での飛跡再構成の様子を示す。roller1 は 200  $\mu\text{m}$  間隔 $\sim$ 1 h/step のステップ駆動、roller2 は 200  $\mu\text{m}$  間隔 150 s/step のステップ駆動、roller3 は 10  $\mu\text{m}$ /step 1.5mm の連続駆動を行った。上から順に 2 段ずつ飛跡再構成を行い、各飛跡の上段フィルム位置-下段フィルム位置(位置ずれ)の分布を求めた。ステップ駆動においては、200  $\mu\text{m}$  間隔の飛跡集団を獲得し 15 s ごとの飛跡集団に分離することができた。連続駆動においても帯状の飛跡集団を確認し、駆動方向(x 軸)とは鉛直の y 方向での位置ずれ分布において飛跡再構成精度 8  $\mu\text{m}$  を獲得した。10  $\mu\text{m}/\text{s}$  で動作をしていたことから、時間分解能にして 8 [ $\mu\text{m}$ ] / 10 [ $\mu\text{m}/\text{s}$ ] = 0.8 [s]を達成しうる。2018 年実験で使われたステージ駆動型(サブ秒)と同等以上の性能を実際の飛跡再構成により示すことができた(M.Oda et al. PTEP にて accepted)。

## 6. まとめと展望

GRAINE 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、フィルム搭載試験、環境試験によりステージ駆動型と同等以上の性能を実証した。

現在、フィルム作成やゴンドラ実装など 2023 年実験に向けた準備を進めている。

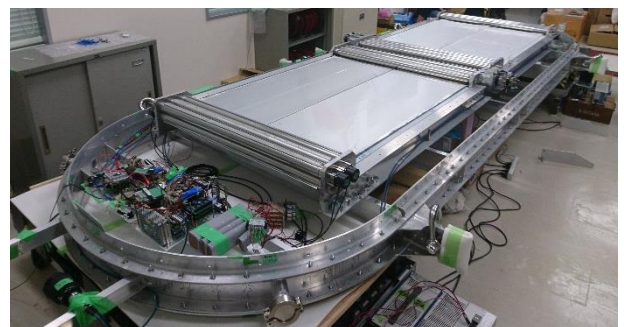


図 10. ゴンドラ実装の様子

参考文献 GRAINE collaboration 2004-2022 年度大気球シンポジウム報告