

## GRAINE 計画:次期気球実験に向けた新型多段シフターの開発

○小田美由紀<sup>1</sup>、青木茂樹<sup>1</sup>、高橋覚<sup>1</sup>、山本知己<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>、ISAS/JAXA<sup>3</sup>、岡山理科大学<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。私たちはエマルシオ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、2022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

エマルシオ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オ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により、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挟み込み駆動させる「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。

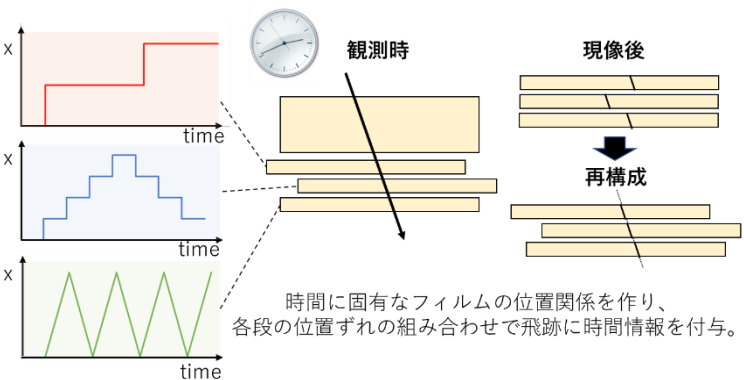


図 1.多段シフター概念

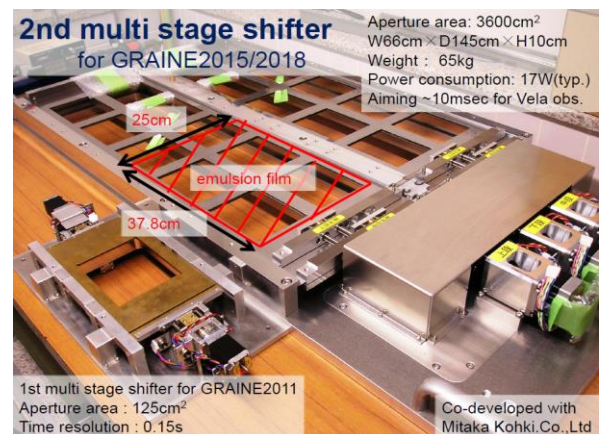


図 2.2011年(手前)、2015、2018年(奥)気球実験に用いたステージ駆動型多段シフター

### 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。

ローラ駆動型シフターの研究開発は 2017 年から始まり、これまでに単段型プロトタイプを用いた動作試験、多段型プロトタイプを用いた動作試験を用いてローラ駆動型多段シフターの実現可能性を実証してきた。多段プロトタイプでの動作試験については「GRAINE collaboration 2019 年度大気球シンポジウム集録」を参照されたい。

これらの動作試験で得られた知見をもとに、フライトモデル 1 号機を三鷹光器と共同開発し、動作試験を進めている。ステージ駆動型に比べて口径面積あたりの重量が約 3 分の 1 となることで 3 倍以上の大面積化が可能となり、大口径面積観測の実現の見通しを得た。

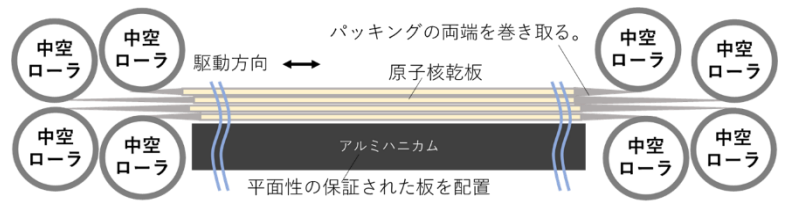


図 3.ローラ駆動型多段シフター概念図

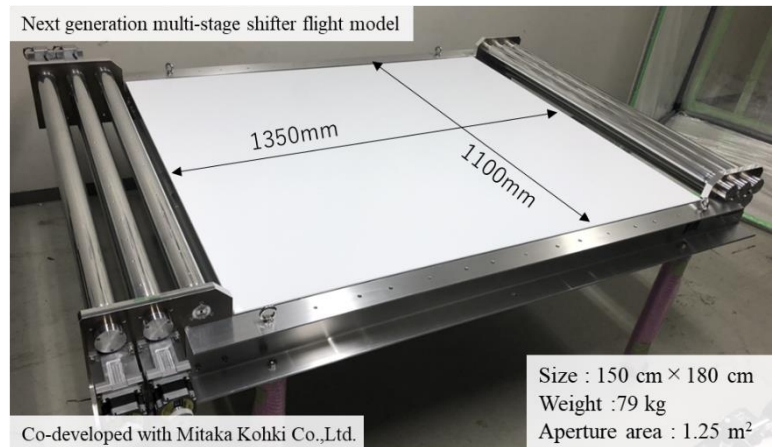


図 4.ローラ駆動型多段シフターフライトモデル 1 号機

### 4. ダミーフィルム搭載試験

図 5 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。ギアには平歯車を 5 段組み合わせたもの(ギア比 1/312.5)を用いており、駆動量を算出するためにエンコーダを用いて各ローラの回転角を測定した。

これまでの動作試験では、パッキング材のみを用いていたが本試験からはエマルジョンフィルムの模擬した PET と高剛性で低物質な背板 CFRP を真空パックしたダミーフィルムパックを用いた。2018

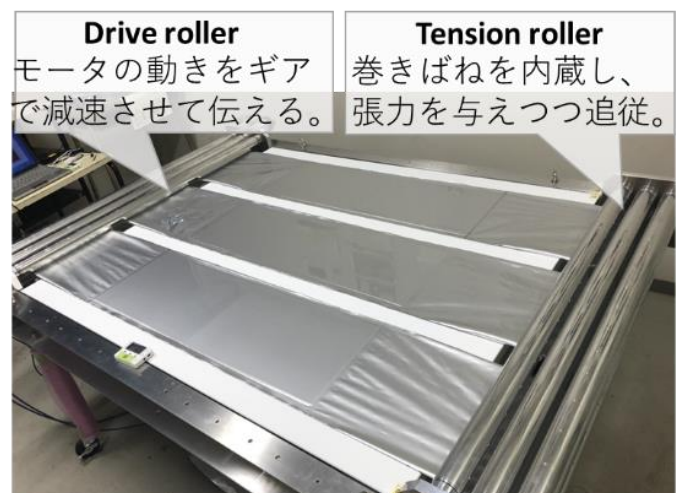


図 5.動作試験のセットアップ

年気球実験での多段シフターエマルジョンフィルムパックの作成に使っていた中型真空包装機を流用して、前回実験 1 unit の約 2.8 倍となる 900 mm × 300 mm の中判真空パックを確立した。1 段につき中判真空パックを 3 帯び固定することで本番実装により近いリアルな動作試験が可能となった。1 段での動作試験で基本駆動精度を確認したのち、フィルムの自重を想定したウェイトを載せて 2 段での連動試験を行い、気球実験のオペレーションに近い動作において、ステージ駆動型(飛跡再構成精度~5 μm)と同等以上の駆動精度を持つことを実証した。計 5 段のうち(一番上の固定段を 0 番として)、2.3 番連動試験、3.4 番連動試験の結果を以下に示す。

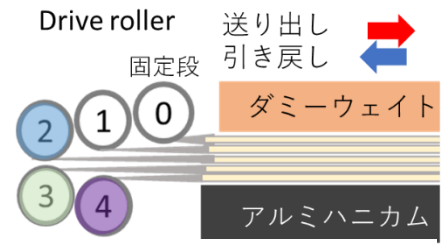


図 6.2 段連動試験セットアップ

### 5. 2 段連動試験(2.3 番ローラ)

2 番の 1 stroke を 200 μm × 30 step の step 駆動、3 番の 1 stroke を 200 μm × 50 step の step 駆動とし、3 番が 1 stroke 終わる度に 2 番が 1 step 進むオペレーション(2 番:約 2.5 時間/stroke, 3 番:約 5 分/stroke)で動作試験を行った。2 番 Drive roller の結果の一部を見ると(図 7(左))、2 番 roller が 3 番の駆動中に待機しながら 200 μm の step 駆動をしていることがわかる。そこで、各 step の待機中の位置の標準偏差を 2 番の停止精度として評価した。送り出し 30 step、引き戻し 30 step の各 step における停止精度をヒストグラムにしたものを図 7(右)に示す。各ローラ全て 1 μm 以下の停止精度を保っていることがわかる。また 3 番に関しては、2 番が 1 stroke 進む間(3 番 15 cycle 分)の各 step 位置再現性を標準偏差で評価したところ、Drive roller 2 μm、Tension roller 3 μm の再現性が確認された(図 8)。2 番の停止精度と 3 番の駆動再現性がともにシフターの飛跡再構成精度 5 μm を十分満たすことを実証した。

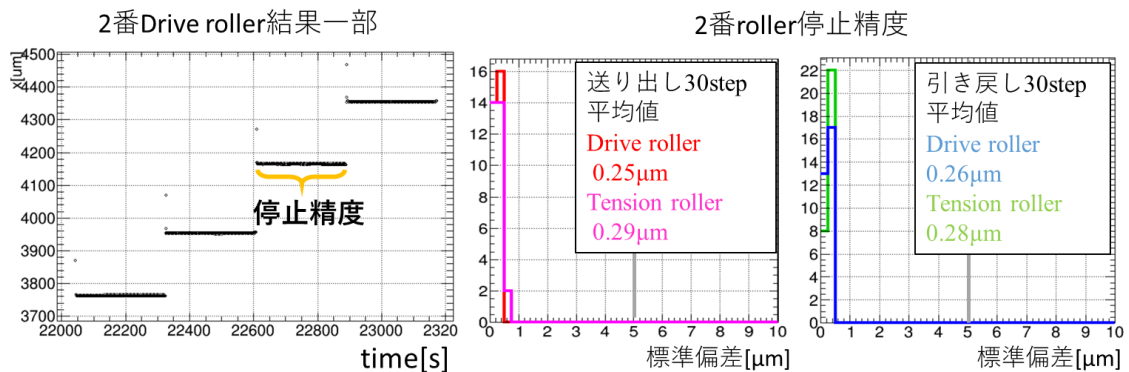


図 7.2 段(2.3 番)連動試験(左)2 番 roller 駆動量結果の一部(右)2 番 roller 停止精度

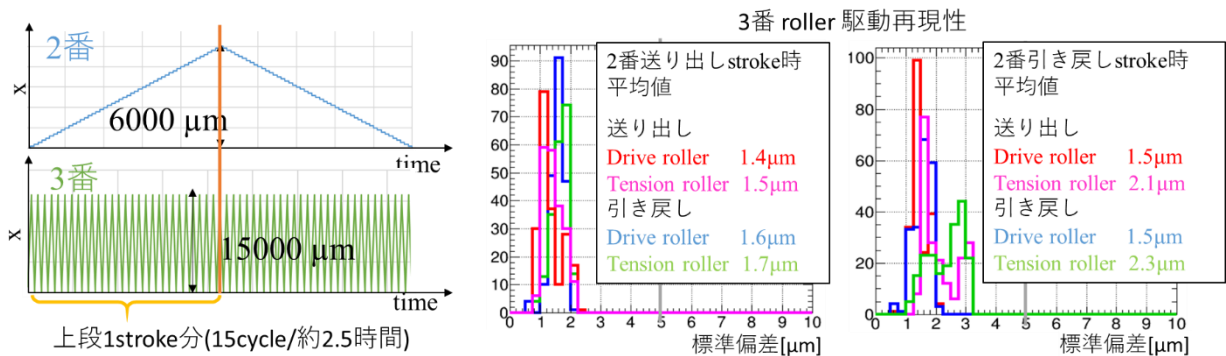


図 8.2 段(2.3 番)連動試験 3 番 roller 駆動再現性

### 5.2 段連動試験(3.4 番ローラ)

3 番の 1 stroke を先ほどと同様の  $200\ \mu\text{m} \times 50\ \text{step}$  の step 駆動、4 番の 1 stroke を  $2\ \text{mm}$  の連続駆動とし、4 番が 1 stroke 終わる度に 3 番が 1 step 進むオペレーション(3 番:約 5 分/stroke,4 番:約 4s/stroke)で動作試験を行った。4 番 roller に関して、3 番が 1 stroke 進む間(4 番 25 cycle 分)の送り出しの始点と終点、引き戻しの始点と終点の位置再現性を標準偏差により評価した。3 番送り出し 25 stroke、引き戻し 25 stroke(計 4.5 時間)にわたって始点と終点の再現性を求め、進行方向によって分けてヒストグラムにしたものを図 9 に示す。Drive roller は  $\sim 2\ \mu\text{m}$ 、Tension roller は  $\sim 3\ \mu\text{m}$  の位置再現性が得られ、シフターの飛跡再構成精度  $5\ \mu\text{m}$  を十分満たすことを実証した。

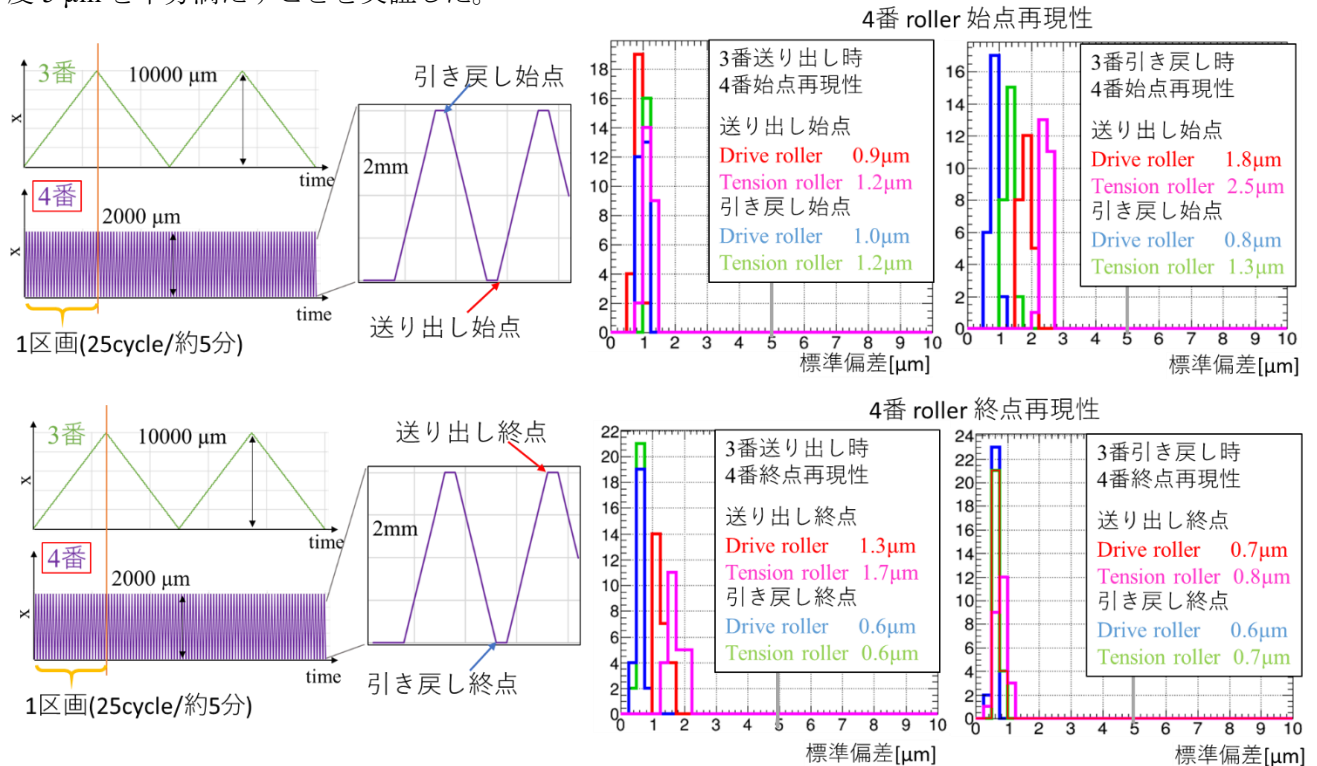


図 9.2 段(3.4 番)連動試験 4 番 roller (上)始点再現性(下)終点再現性

### 6. まとめと展望

GRAINE 次期気球実験では 2022 年による口径面積・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。大口径面積望遠鏡の実現に向けて多段シフターは従来のステージ駆動型からローラ駆動型へとモデルチェンジをし、約 3 分の 1 の軽量化と 3 倍以上の大面積化を行ったフライトモデル 1 号機を作成した。増段や段間の gap が狭まったことにより、大口径面積、長時間、高時間分解能観測の実現可能となる。また、今回から中判のダミーフィルム真空パックを用いた動作試験を初めて実施し、気球実験に近いオペレーションにおいてステージ駆動型と同等以上の駆動精度を実証した。現在、3 段での連動試験やフライトモデル 2 号機の作成を進めている。また、特注大型真空包装機の導入や暗室環境の立ち上げといった気球実験で最大規模となる大面積パック実現に向けた作業環境が整いつつあり、エマルジョンフィルム搭載試験や環境試験などの 2022 年気球実験に向けた準備を進めていく。

### 参考文献

GRAINE collaboration 2004-2020 年度大気球シンポジウム報告