

GRAINE 次期気球実験に向けた大面積、長時間、高時間分解能 を実現する新型多段シフターの開発

○小田美由紀¹、青木茂樹¹、高橋覚¹、山本知己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

宇宙ガンマ線の観測は、加速起源の探索や高エネルギー事象の理解を進める手がかりとなる。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 2011 年に原理実証実験、2015 年と 2018 年に性能実証実験を終えた。次期気球実験では大面積望遠鏡による科学観測を予定し、現在それに向けた準備を進めている。

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。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。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 では独自に開発した「多段シフター」(図 1)を用いて飛跡に時間情報を付与している。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。

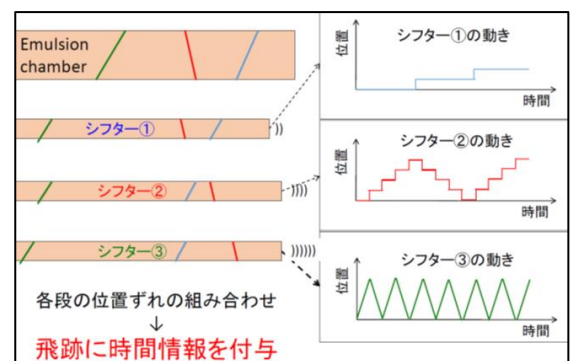


図 1.多段シフター概念図

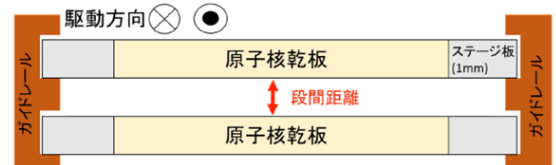


図 2.ステージ駆動型シフター概念図

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参考文献を参照されたい。

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は、検出器の大面積化、駆動時間の拡大、高時間分解能が必須である。しかし、従来のステージ駆動型をそのまま大規模化すると気球に搭載できる重量を大きくオーバーしてしまう。そこで、多段シフターには大幅な軽量化が求められた。また高い時間分解能で長時間正確なタイムスタンプができるようにするため、段間のギャップをつめるといった工夫も必要となった。そこで多段シフターは「ローラ駆動型」へと大きくモデルチェンジした。

3. ローラ駆動型多段シフター

ローラ駆動型多段シフターはフィルムを保護しているラミネート紙にあらかじめマージンを設けて置き、そこをローラに取り付けて巻き取るようにしてフィルムをシフトさせる。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。金属のステージ板とガイドレールがなくなったことにより大幅な軽量化を達成し、ギャップも 500 μm 以内につめることができるようになる。

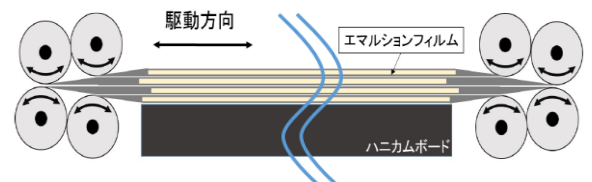


図 3.ローラ駆動型シフター概念図

ローラ駆動型シフターの研究開発は 2017 年から始まり、単段型プロトタイプ(図 4)を用いた駆動試験が卒業生によって進められた。私は、更なる軽量化のために中身の空いた中空ローラを用いて駆動試験を行った。その際、

従来の平歯ギアに加えて弾性変形を利用したハーモニックギアを用いて詳細な理解を進めた。

単段型プロトタイプでローラ駆動型が実行可能であることが分かったため、装置をさらに大規模化した多段型プロトタイプ(図 5)を用いて駆動試験を行った。多段型プロトタイプの重量は単位面積あたりにして従来のステージ駆動型の半分の重量であり、一番上を固定段とした計 6 段分のローラからなる。モータのついているローラを **Drive roller** と言い、向かい側のローラを **Tension roller** と呼んでいる。**Tension roller** には巻きばねが付いており、ラミネート紙をピンとはる方向に常にテンションをかけ続ける。モータにパルスを送り **Drive roller** が駆動するとラミネート紙を介して **Tension roller** が追従していく。

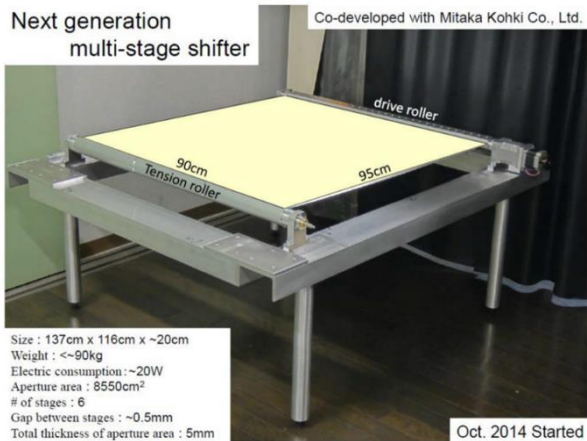


図 4. ローラ駆動型シフター単段型プロトタイプ

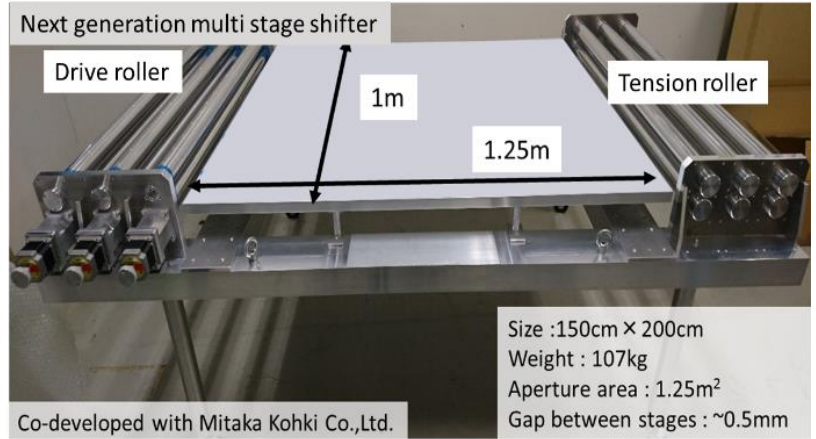


図 5. ローラ駆動型シフター多段型プロトタイプ

4. 多段型プロトタイプ駆動試験(各段独立)

ラミネート紙一枚を用いて各段で基礎的な駆動試験を行った。モータと **Drive roller** 間の減速機構には平歯ギア(ギア比 1/312.5)を用いた。測定の際には、エンコーダを用いてローラの回転角を測定した。図 6 に試験のセットアップを示す。

駆動内容は $100\mu\text{m} / \text{step} \times 150\text{step} = 1.5\text{cm}$ の往復運動とした。1 往復 300step を 1cycle として、計 350cycle を評価した。多段シフターは段間の相対的な位置情報を用いて飛跡に時刻情報を与えるため、駆動量の再現性を評価の対象とする。求められる再現性の目安は GRAINE2018 のシフター飛跡再構成精度 $\sim 5\mu\text{m}$ とする。

オペレーションにおける設計値を論理値と呼び、論理値ごとに原点からの駆動量の再現性を評価する。今回は 10cycle(25 分間)内での駆動量の標準偏差を再現性とした。具体的な例として、図 7 に 5 番ローラの 251~260cycle における各論理値での実測値再現性を示す。横軸に論理値、縦軸に再現性を載せる。**Drive roller** と **Tension roller** の送り出しと引き戻しをそれぞれの色でプロットした。どの位置においても $2\mu\text{m}$ の再現性が得られていることが確認できた。

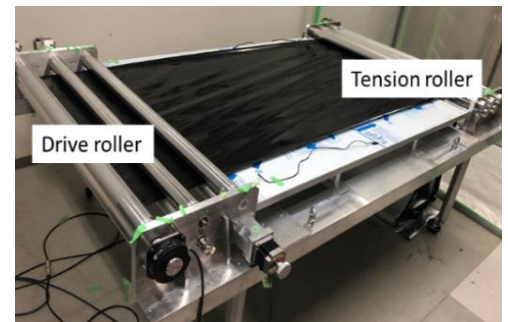


図 6. 駆動試験のセットアップ

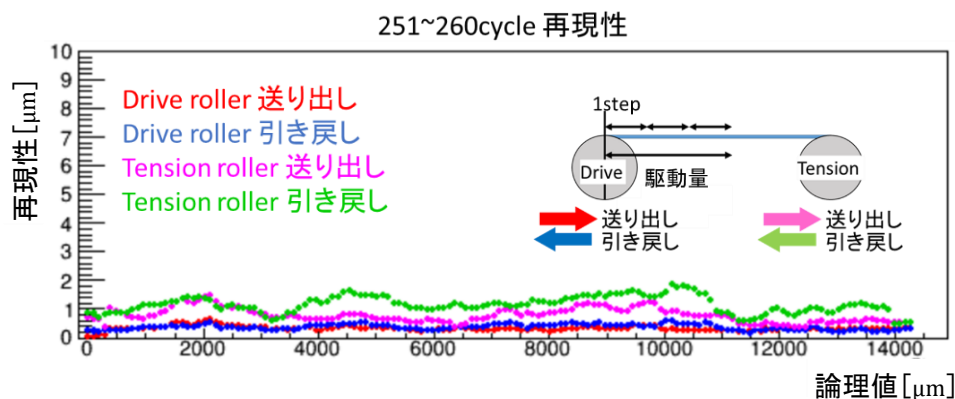


図 7. 251~260cycle 目における駆動量の実測値再現性を示す。横軸はオペレーションによって決まる設計値(論理値)であり、各論理値における 10cycle 内の標準偏差を載せている。

同様の解析をローラごとに全 350cycle(10cycle×35)で行い、再現性をヒストグラムにしたものを図 8 に示す。どのローラも Drive roller は 1 μ m 程度の再現性を保って 14 時間半安定駆動をし続けたことが分かった。飛跡再構成精度と同等以下の数 μ m の再現性が得られていた。多段プロトタイプにおける一通りの基礎的な駆動試験において、各段独立に十分な駆動精度があることを確認した。

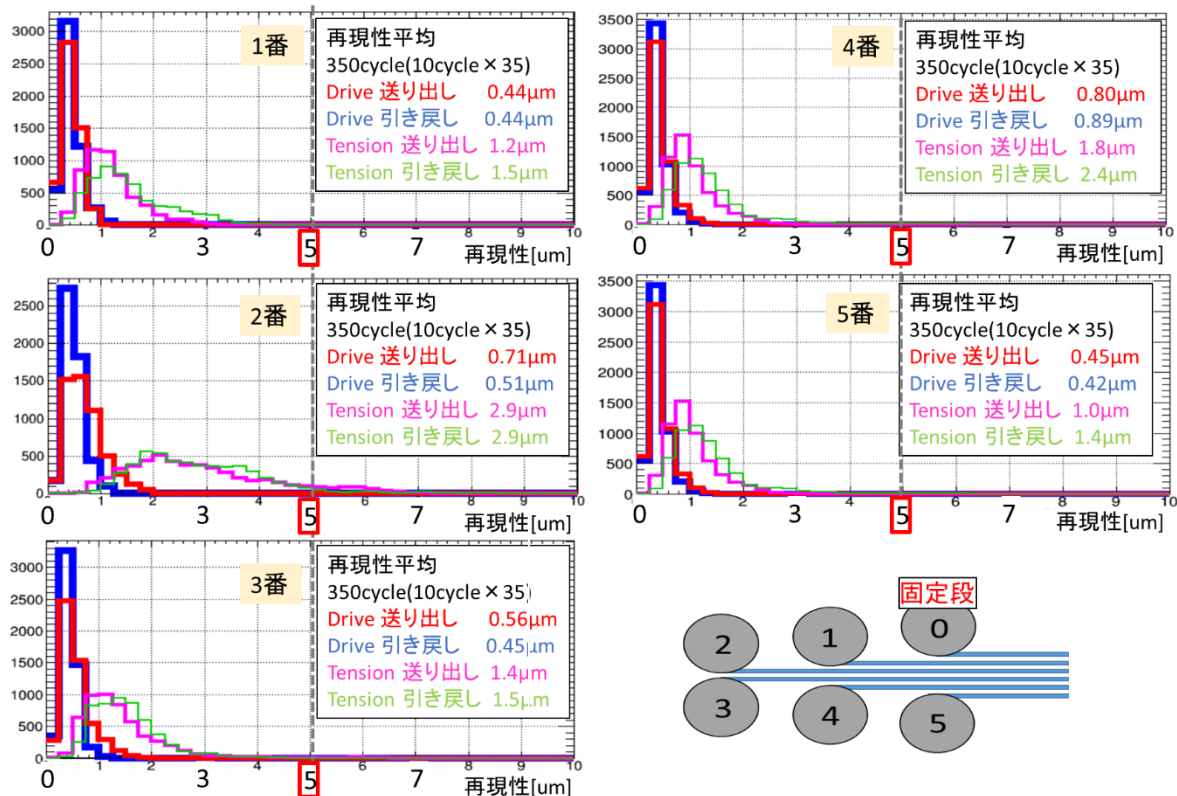


図 8.350cycle(14 時間半)の再現性を示す。左から順に 1.2.3.4.5 番ローラの Drive roller ,Tension roller 送り出し、引き戻しそれぞれの再現性をまとめた。右下にはそれぞれのローラの位置関係を示す。

5. 多段型プロトタイプ駆動試験(連動)

各段独立の駆動試験による駆動精度が確認できたため、4 番と 5 番ローラを用いて 2 段連動による駆動試験を行った。上に重しを置き、ラミネート紙を擦らせるようにして駆動させた。駆動内容は前述の試験と同様の 100 μ m /step×150step=1.5cm の往復運動を各段交互に行った。駆動時 200cycle と停止時 200cycle を評価し、2 段連動で動かしても駆動精度に影響がないか確かめた。

まず駆動時の 200cycle のみを取り出し、前述の試験と同様に 10cycle(50 分間)内の駆動量再現性を求めた。図 10 に結果を示す。どちらの段も 5 μ m を下回る再現性が出ており、2 段連動にしても各段の駆動精度は十分保たれていることが分かった。

次に停止時の 200cycle のみを取り出し、相手が駆動中でも停止位置を維持できるかを確かめた。駆動側の送り出し時、引き戻し時における停止している段の位置の標準偏差を求め安定性とした。(始めの 10step 分を除いた計 140step 内の標準偏差を求めた。) 図 11 に結果を示す。どちらのローラも 1~2 μ m ほどの安定性が確認できており、他の段が駆動していても停止位置を維持できていることが分かった。

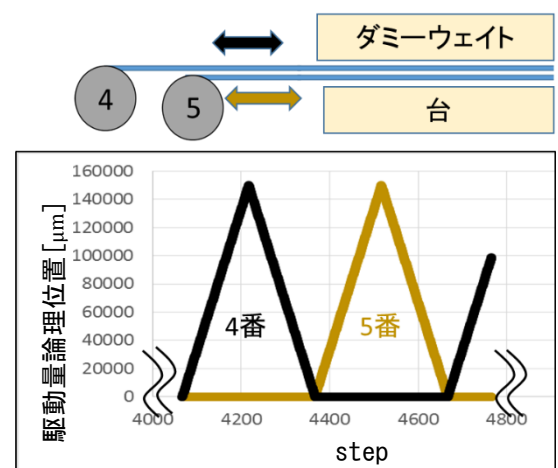


図 9.(上)セットアップの概略図。(下)オペレーションの一部。4000step 目から 4800step 目までの 2 段の駆動量論理値を示す。1.5cm の往復運動を交互に行う。

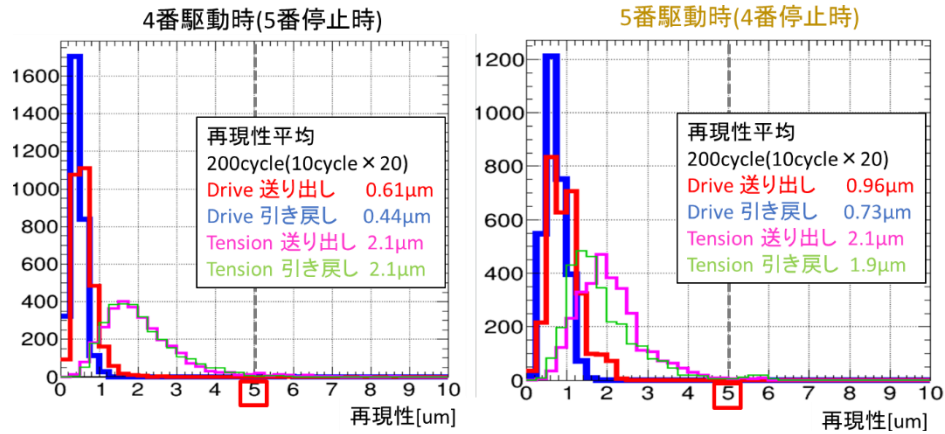


図 10.各ローラ駆動時の再現性を示す。左に 4 番駆動時(5 番停止時)のもの、右に 5 番駆動時(4 番停止時)のものを示す。

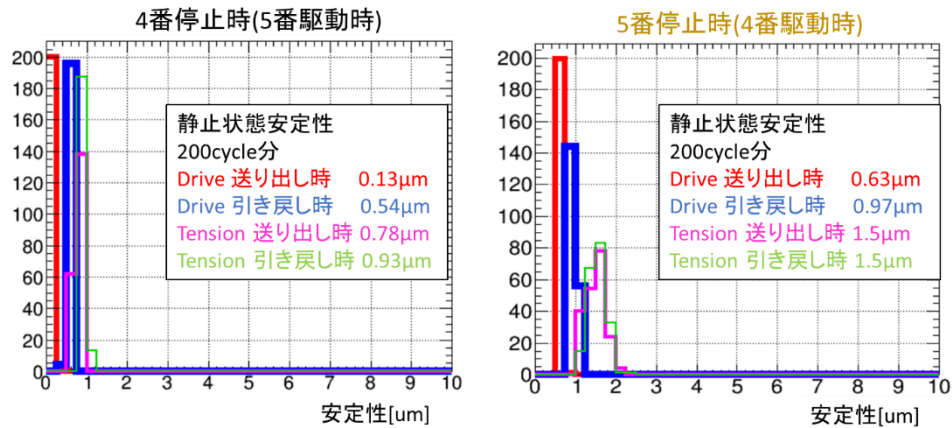


図 11.各ローラ停止時の安定性を示す。左に 4 番停止時(5 番駆動時)のもの、右に 5 番停止時(4 番駆動時)のものを示す。

6. まとめと展望

GRAINE 次期気球実験では大面積望遠鏡による科学観測の開始を目指す。大面積、長時間、高時間分解能を実現するためシフターはローラ駆動型へとモデルチェンジをした。

ローラ型多段シフター多段型プロトタイプによる基礎的な駆動試験を一通り終え、GRAINE 実績にもとづく飛跡再構成精度と同等以下の再現性を各段独立に得ることができた。現在、複数段による連動試験を進めている段階であり、2 段の連動試験においても各段独立な駆動精度を確認することができている。また駆動側の動きに影響されずに停止位置を保っていることも分かった。連動試験が終わったのちに、フィルム搭載試験によって相対精度を確かめていく。その後、環境試験へと進めフライトモデルを作成して気球実験へと臨む。

参考文献

- ・ GRAINE collaboration 2014-2019 年度大気球シンポジウム報告