

## GRAINE2018：多段シフターの報告

神戸大, 愛教大<sup>A</sup>, ISAS/JAXA<sup>B</sup>, 岡山理科大学<sup>C</sup>, 名大<sup>D</sup>

○呉坪健司, 中村元哉, 松田菖汰, 丸嶋利嗣, 青木 茂樹, 高橋覚, GRAINE collaboration

### 1. はじめに

宇宙ガンマ線の観測は宇宙空間の高エネルギー物理現象の理解に重要である。数十MeVから数百GeVの宇宙ガンマ線の観測は2008年に打ち上げられたFermi衛星LAT検出器により大きく発展し、5年間で3000を超えるガンマ線天体が発見された。その一方で超新星残骸における粒子加速機構の観測やパルサーにおける放射機構の解明を詳細に進めていくには、高い角度分解能を有し偏光感度を持つ次世代のガンマ線望遠鏡による観測が求められる。

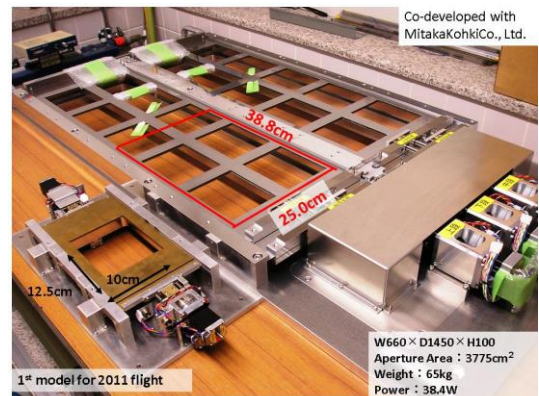
### 2. GRAINE実験

#### 2.1 エマルジョン望遠鏡によるガンマ線精密観測計画:GRAINE

10MeV以上のエネルギーのガンマ線の観測では対生成で生じた電子対の飛跡を精密に観測することが重要である。エマルジョンフィルムは低物質質量( $\sim 10^{-3}X_0$ )かつ高分解能( $\sim 0.1 \mu m$ )が特徴の三次元飛跡検出器であり、電子対生成反応を精密に測定することで、ガンマ線に対してFermi-LATを上回る優れた角度分解能や未だ実現されていない偏光に対する感度を持つ。そこで我々は、原子核乾板(エマルジョンフィルム)によるエマルジョン望遠鏡を気球に搭載することで宇宙ガンマ線を精密に観測するGRAINE計画を推進している。

#### 2.2 タイムスタンプ:多段シフター

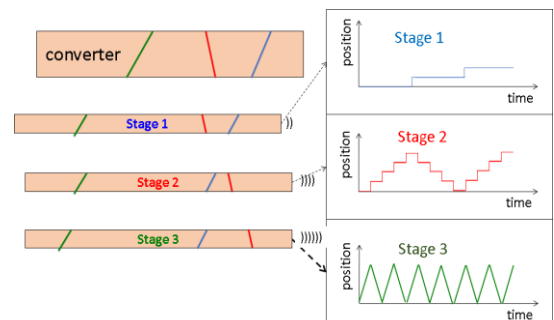
原子核乾板は積分検出器であり、時間情報を持たない。しかし、時刻ごとに天球に対する検出器の姿勢を決定し、宇宙ガンマ線を天球上にポインティングするためには、ガンマ線の到来時刻を決定する必要がある。そこで、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプとして多段シフターを採用している(図1)。多段シフターは複数のステージから構成されており、エマルジョンフィルムを搭載した各ステージを独立の周期で駆動させることで、時刻ごとに固有なステージ位置関係を構成する。解析時には各ステージのフィルムに記録された飛跡をつなぐ際の位置ずれ量から荷電粒子貫通時のステージ位置関係を再構成し、貫通時の時刻情報を得ることが出来る(図2)。



【図1】奥側:多段シフター3780cm<sup>2</sup>モデル  
手前側:多段シフター125cm<sup>2</sup>モデル

### 3. GRAINE2018年豪州気球実験

GRAINEは地上実験や2011年に行った気球実験による原理実証の結果に基づき、2015年にVelaパルサーをターゲットとした天体観測をすることを目的として気球実験を行った。望遠鏡の口径面積やフライト時間の拡大、時間分解能の向上には成功したが、当初の目的であるVela検出には至らなかった。そこで、Vela Pulsarの検出による総合的な望遠鏡の性能実証を目的としてGRAINE2018年豪州気球実験

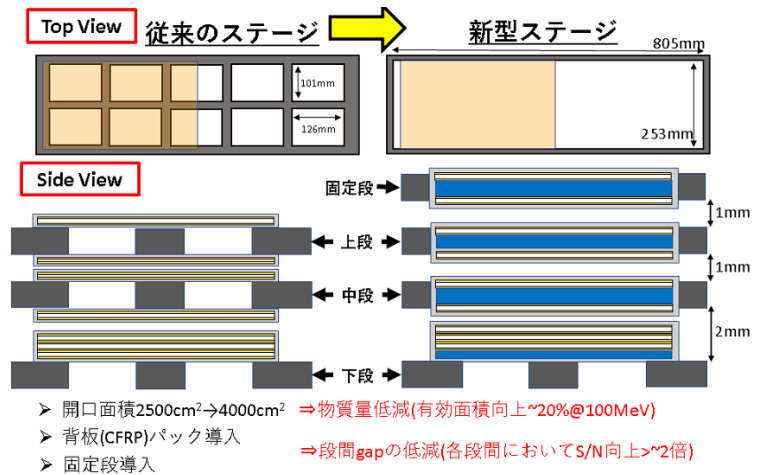


【図2】多段シフター機構の概念図

を実施した。

### 3.1 多段シフター改良点

GRAINE2015に運用した多段シフターの結果より、GRAINE2018に向けて克服すべき課題は主に2つあった。1つ目はフィルム実装不良に伴う抵抗増大による部分的なステージ動作不良である。この原因よりGRAINE2015において多段シフターの3ステージのうち1段、左右ステージの片側における往復運動のうち送り動作で同一地点に停止し続けた不具合があった。不具合の割合は1/12だが全段の情報を使



【図3】 フィルム搭載デザインの改良前後の概念図

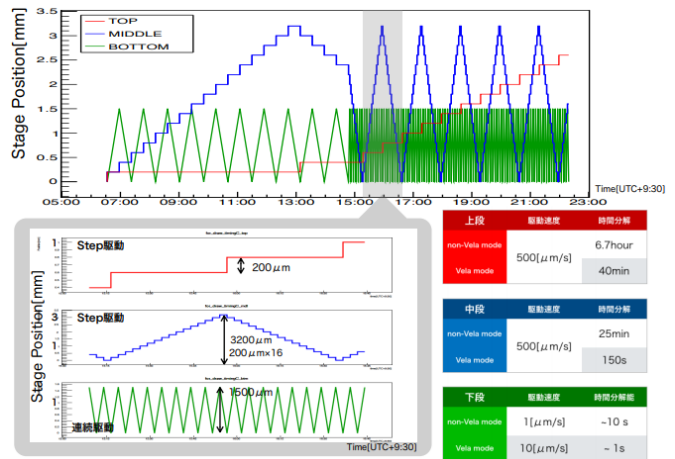
ってタイムスタンプするため有効面積的に1/4の損失となった。この問題への対策としてシフターフィルムの搭載方法の見直しを行った(図3)。またその上でフィルム実装後のステージ動作の目視確認およびマイクロメータを用いた実測によるステージ正常動作確認方法を確立し、ステージ動作不良問題を克服した。2つ目の課題はステージ動作パラメータに不備があったことである。多段シフター中段の行き返りの状態が分離できない動作パラメータを使用したためタイムスタンプバックグラウンドが2倍増加した。この問題への対策として、上段を用いて中段往復分の状態を分離するステージ動作パラメータを採用した。これらの問題解決に伴って導入した新たなステージやフィルムパックを実験へ導入する上で必要な環境試験やフィルムケミカル試験等を行い、問題なく導入可能であることを実証しGRAINE2018へ導入した。

### 3.2 多段シフターフライトオペレーション

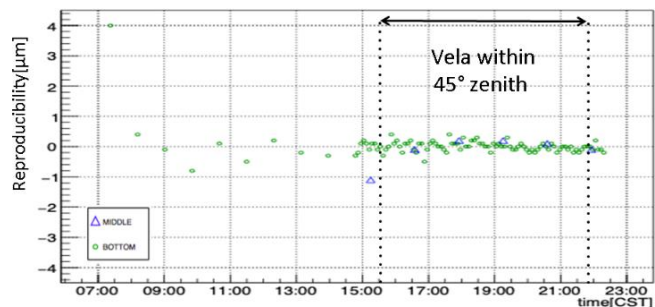
多段シフターによるタイムスタンプの時間分解能  $\delta t$  は下段ステージの位置決定精度を  $\delta dx$ 、下段ステージの駆動速度を  $v$  として  $\delta t = \delta dx / v$  で与えられる。本実験ではvela視野内以前の低速モードである non velaモード( $v=1\mu\text{m/s}$ )とvela結像に要する時間分解能のvelaモード( $v=10\mu\text{m/s}$ )を併用した(図4)。これまでの多段シフターの動作試験の結果から、non vela駆動モードで  $\delta t \sim 10$ 秒、高速駆動モードで  $\delta t \sim 1$ 秒程度の時間分解能が見込まれている。放球直後から低速駆動を開始し、Velaパルサーがエマルジョン望遠鏡の45° 視野に入る30分前後の時間をvelaモードで運用した。

### 3.3 フライト時機械的動作の健全性

フライト時の多段シフターの動作の健全性をステッピングモーターに送ったパルス数で評価した。ステージ送り出し時のパルス数と引き戻し時のパルス数の差分を機械的な駆動再現性として定義し、時



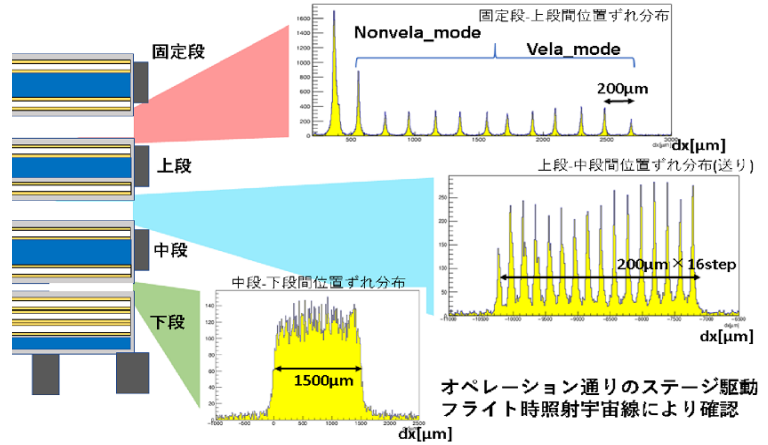
【図4】 GRAINE2018 シフター観測時オペレーション



【図5】 フライト時の各段駆動再現性

刻毎の変化を図4に示す。点の密度の違いはオペレーションの違いを反映している。この結果から、全観測時間に渡って1 $\mu$ m未満の高い再現性で動作していたことが確認できた(図5)。

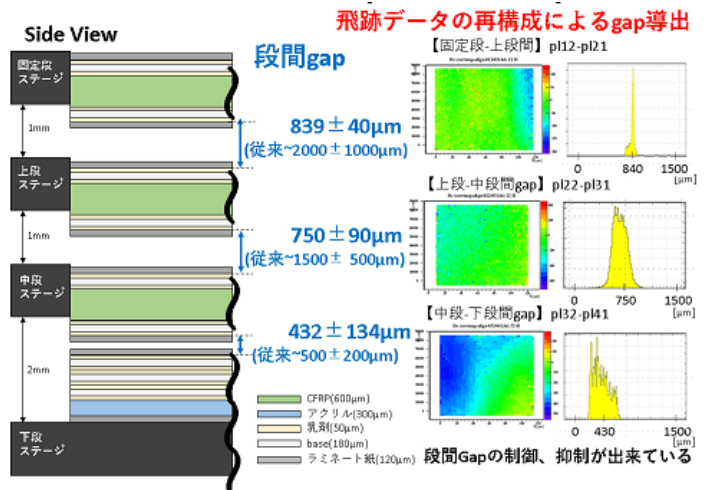
また、フィルム内に記録された飛跡を読み取って取得したスキャンデータの解析によってステージ安定駆動を確認した。フライト時に各ステージに搭載したフィルムを貫通した宇宙線を用いて、各段間でつながる飛跡の位置ずれ量を評価した。運用した左右両側、上中下段全ステージにおいて駆動オペレーションに対応した飛跡分布が得られており、2015年気球実験で起こったステージ不具合問題が克服されたことをフライト飛跡で実証した(図6)。



【図6】 照射宇宙線を各段間の接続時飛跡位置ずれ分布

### 3.4 シフター段間gapの改善

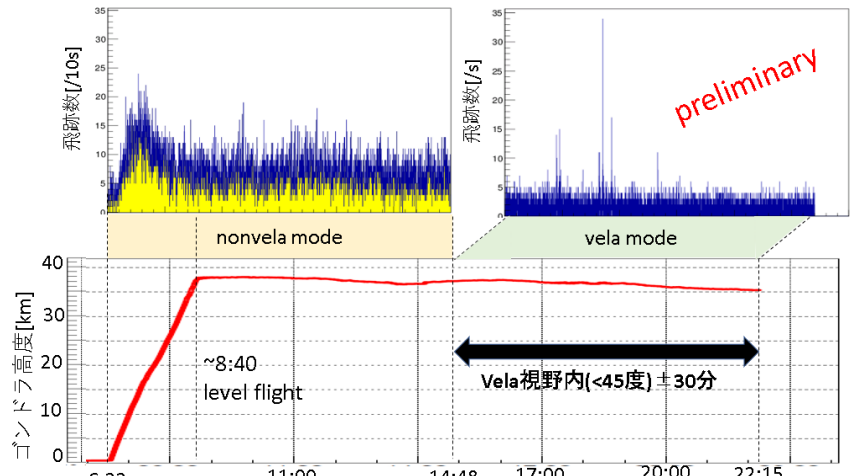
望遠鏡内に到来したガンマ線にタイムスタンプする上で、多段シフターの各段間のフィルムに記録された飛跡をつなげる必要がある。飛跡をつなぐ際に外装する距離が長くなると、それに伴う接続windowの増加によりつなぎ間違い率が増加してしまう。よって、タイムスタンプの信頼性を高める上で、各段間のgapを詰めることが非常に重要である。GRAINE2018でシフターフィルム搭載デザインの改良により導入した枠型ステージ・背板パックフィルムを使用することで、gapの制御及び低減が可能となり、各段間において飛跡をつなぐ際のS/Nが $\sim$ 2倍向上するデザインとなっている。解析フィルム1area(12cm $\times$ 9cm)データを用いて飛跡再構成による各段間のフィルムgapを導出した(図7)。2015年フライト時のデータと比べて段間最近接フィルムの距離およびその一様性が大いに改善したことがわかる。



【図7】 飛跡データ再構成による各段間フィルムの gap 導出

### 3.5 タイムスタンプ

シフター動作実績に基づいて解析フィルム1area(12cm $\times$ 9cm)の時刻情報を付与した。高度の上昇に伴



【図8】 フライト時の飛跡のカウンtrate及び高度データ

って飛跡数が増大し、シャワー極大値で最大となったのが確認できる(図8)。Velaが望遠鏡の視野内にある時間帯を含めた水平浮遊時は安定したカウントレートを示している。今後タイムスタンプした飛跡の各モード時のバックグラウンドや検出効率の理解を進め、望遠鏡のタイムスタンプ効率等や解析フィルム面積を拡大、他検出器とのマッチングを用いた解析を行う。

#### 4. まとめと展望

Velaパルサーの有意な検出による望遠鏡の性能評価を目的とした2018年気球実験へ向けて、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンパーである多段シフターの準備・開発及び気球実験での運用を行った。2015年フライトにおけるシフターの課題点であった部分的ステージ不具合や運用オペレーションの問題を解決し、さらにタイムスタンプ信頼性を高めるために段間のgapを制御および低減させるフィルム搭載デザインをさまざまな準備実験を経て問題なく導入可能であることを実証し、2018年気球実験へ導入した。

フライト時の多段シフターの運用は問題なく完了し、全ステージにおける機械的動作の健全性が $1\mu\text{m}$ 以下の再現性で得られていることを確認した。フィルムの現像やその後の処理を終え、フィルム内に記録された飛跡の読み取り処理を全てのシフターフィルムで完了した。現在はフライトデータの解析を進めている。フライト時の飛跡を各ステージで再構成することで、左右両ステージにおいて全段がオペレーション通りに正常に駆動したことを照射宇宙線飛跡を用いてフライトデータで確認した。また、飛跡のタイムスタンプ処理を進めており両ステージ各1解析エリアにおいてフライト時における全駆動モードでのタイムスタンプを行った。飛跡数の高度依存性や水平浮遊時の安定したトラックレートが得られていることを確認した。今後はタイムスタンプ処理後のバックグラウンドや検出効率の理解を進め、望遠鏡のタイムスタンプ効率等や解析フィルム面積の拡大、他検出器とのマッチングを用いた解析を行う。

#### 6. 参考文献

- GRAINE collaboration(エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ)2004-2018年度大気球シンポジウム報告
- S.Aoki et al., Adv. Sp. Res. Vol. 37 (COSPAR 2004 Proceedings) pp. 2120-2124.
  - S.Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620(2010) 192-195.
  - H.Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701(2013) 127-132.
  - S.Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.
  - K.Ozaki et al., JINST 10 P12018(2015).
  - S.Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.
  - K.Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A833(2016)165.
  - 高橋覚、青木茂樹、日本物理学会氏72巻10号(2017)734-742.
  - S.Takahashi, S.Aoki et al., Adv. Sp. Res. (2017)10.1016/j.asr.2017.08.029