

GRAINE

～次期フライトへ向けた多段シフター動作試験～

水谷 深志 (神戸大学大学院 人間発達環境学研究科)

Abstract

我々は Fermi-LAT の角度分解能を 1 桁近く上回るエマルジョン望遠鏡を作成し、ガンマ線天体の高分解能観測を目指す GRAINE 計画を推進し、現在は 2014 年のフライトへ向けた準備を進めている。多段シフターはガンマ線イベントに時間情報を付与するために開発された機構である。常温常圧環境下において多段シフターは十分な動作性能をもつことが確認できた。現在は低温低圧環境試験のデータ解析を進めている。

1 はじめに

宇宙観測は可視光をはじめ、赤外、X 線など様々な波長で行われてきた。しかしながらガンマ線領域では観測の難しさからイメージングの精度は他波長と比較しても劣っている。NASA が 2008 年に打ち上げた Fermi 衛星 LAT 検出器は 2000 近くのガンマ線天体を発見し、ガンマ線天文学の発展に大きく寄与した。多くの科学的成果が挙がるとともに他波長との対応が取れない未同定天体など多くの課題も浮き彫りになっている。そこで今後は、個々の天体をより精密に観測し他波長との観測結果と突き合わせながら議論を進めていくことが求められる。

そこで我々は高い位置精度を持つ原子核乾板からなるエマルジョン望遠鏡を作成し、ガンマ線天体の精密観測・偏光観測を目指す GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) 計画を推進している。GRAINE は 2011 年 6 月に北海道大樹町にてエマルジョン望遠鏡の各構成要素の運動試験、及び宇宙ガンマ線観測時にバックグラウンドとなる大気ガンマ線フラックスの実測を目的としたテクニカルフライトを実施し、目的を達成した。これを踏まえ、現在は 2014 年に予定されている次期フライトへ向けた準備を進めている。このフライトではガンマ線領域で最も明るい天体である Vela pulsar の 5σ の検出、及び世界最高精度でのイメージングを目的としている。現在はエマルジョン望遠鏡の構成要素の一つである「多段シフター 2 号機」の動作試験を行っている。本講演では解析現状について報告する。

2 エマルジョン望遠鏡

2.1 原子核乾板

原子核乾板(エマルジョンフィルム)は荷電粒子の飛跡をサブミクロンオーダーで記録する 3 次元飛跡検出器である。原子核乾板はプラスチックベースの両面に感度を持つ乳剤が塗布された構造になっている。乳剤層を荷電粒子が通過すると飛跡に沿って潜像核が生成され、現像処理を施すことで銀粒子の粒(グレイン)の連なりとなり飛跡が観察できる。また、検出器の物質も小さいため対生成後の電子対の角度を電磁散乱による不定性を抑えて測定することが可能になり、ガンマ線に対して高い角度精度 ($0.10\text{deg}@1\text{GeV}$) が実現できる。

2.2 エマルジョン望遠鏡

図 1 にエマルジョン望遠鏡の概念図を示す。上流側からコンバーター部、タイムスタンパー部、カロリメーター部となっている。コンバーター部はエマルジョンフィルムを 100 枚程度積層させた構造をしており、ガンマ線の標的兼検出器の役割を果たす。タイムスタンパー部は多段シフターという機構を用いてガンマ線が対生成して生じた電子対に時間情報を与える。GeV 以上のガンマ線イベントに関してはさらに下流のカロリメーター部で、エネルギーを測る。さらにスターカメラによる姿勢モニターのデータと統合することで、ガンマ線の到来方向を天球上にポイントする。

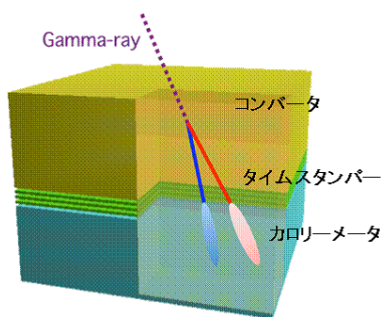


図 1: エマルジョン望遠鏡概念図

2.3 多段シフター

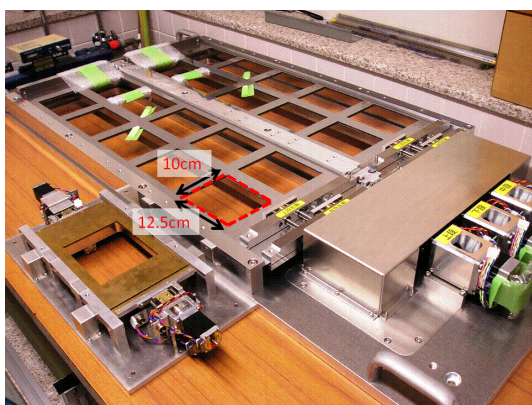


図 2: 多段シフター 1 号機と 2 号機

原子核乾板は写真フィルムであるため本来時間情報を持たないが、ガンマ線を天球上にポイントする際には時間情報が必要となる。そこで原子核乾板に時間情報を与えるために考案されたものが多段シフター機構である。多段シフターは複数のステージをアナログ時計の時針・分針・秒針のように異なる周期で駆動させることで、時間に対して固有なステージの位置関係を作り出す。ステージにはエマルジョンフィルムがマウントされており、ステージを貫通したトラックをつないだ際に生じる位置ずれ量からステージの位置関係を再構成し貫通トラックに時間情報を与える仕組みになっている。図 2 に多段シフ

ターの写真を示す。左側がテクニカルフライトで使用した多段シフター 1 号機である。ステージの枠にエマルジョンをマウントして使用する。1 号機は上空 35km において正常に動作し、タイムスタンプの時間分解能 0.1s を達成した。現在動作試験を行っているのは右側の 2 号機である。ステージはモーター側から見て左右に 2 枚あり、それぞれのステージにはエマルジョンをマウントする枠が 10 か所ずつ設けられている。よって全体として 20 ユニットのマウントが可能である。また、ステージは 3 段あり各段、左右のステージは同じステッピングモーターと繋がっている。モーター付近には再現性を保証するための原点センサがあり、ステッピングモーターに送るパルス数でステージの駆動量の制御を行うオープンループ方式を導入している。

3 動作試験・結果・考察

3.1 多段シフターの駆動特性と時間分解能

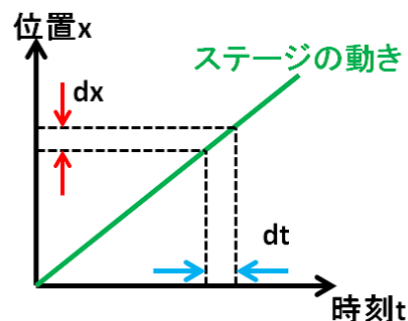


図 3: 駆動特性と時間分解能

ここでは多段シフターの駆動特性と時間分解能について述べる。図 3 は横軸に時刻、縦軸にステージの変位量を取り、緑線でシフター最下段のステージの動きを示したものである。多段シフターによるタイムスタンプでは最下段のステージの位置決定が最も重要である。ステージの位置決定の精度はステージ間のトラックのつなぎ精度で与えられる。ここで、ステージの駆動再現性や等速性が悪いと図では緑線が太くなる効果を持つ。その場合、同程度のつなぎ

精度であったとしても時間分解能は悪くなる。トラックのつなぎ精度が $6\mu\text{m}$ 程度であることから、再現性や等速性は $6\mu\text{m}$ よりも十分に小さいことが求められる。多段シフター 2 号機の駆動特性が十分であるかどうかを確認するための試験を以下のように行った。

3.2 メカニカル試験

試験内容

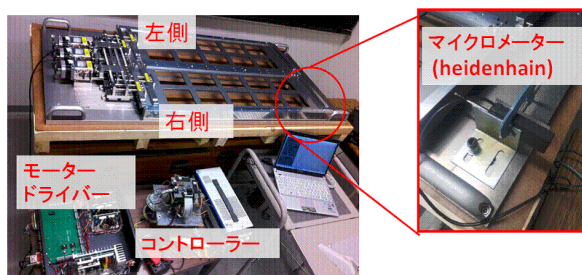


図 4: メカニカル試験セットアップ

動作試験としてまずマイクロメーターを用いて再現性・等速性の評価を行い、多段シフターの持つ機械的な特性を調べる試験を行った。図 4 のようにマイクロメーターをステージに押しつけた状態でステージを $500\mu\text{m}$ ずつ動かし、 1cm を 6 往復させた。ステージの停止位置それぞれにおけるステージ座標のばらつきを再現性と定義して評価をした。また、同様のセットアップでステージを $50\mu\text{m/s}$ で連続的に 10 往復させ、その間 0.1s 刻みで取得したステージの座標が等速運動からどの程度ずれているかを等速性と定義し評価した。

結果・考察

表 1: ステージ駆動再現性 [μm]

	左側	右側
1 段目	0.77	0.58
2 段目	0.55	0.78
3 段目	0.60	0.34

全てのステージについて再現性の評価を行った結果を表 1 に示す。この結果より左右 3 段計 6 ステージすべてにおいて $1\mu\text{m}$ 未満の機械的再現性があることが確認できた。これはトラックのつなぎ精度と比較して 1 桁程度小さく十分な再現性である。

続いて、3 段目ステージに関して等速性の評価を行った。等速運動からのずれの許容値としてトラックのつなぎ精度 $6\mu\text{m}$ を採用すると、全体の 99.96% が許容値の範囲内に入り、等速性も十分であることが確認できた。

3.3 常温常圧環境試験

試験内容

メカニカル試験より十分な機械的再現性をもつことが確認できたため、実際に図 5 のようにシフターエマルジョンをマウントして、試験中にエマルジョンに記録されたトラックを用いて 3 段目ステージの再現性の評価を行った。また、図 6 に試験時の 3 段目のステージの駆動法を示す。



図 5: 常温常圧環境試験セットアップ

結果・考察

それぞれの時間帯に蓄積したトラック集団について、ガウス分布でフィットしステージの変位量に相当するトラックの位置ずれ量を分布のピークの値として評価した。

すべての時間帯について同様の操作を行い再現性を評価したところ、エマルジョンフィルムで評価した再現性は $3.1\mu\text{m}$ 以下であるという結果を得た。この再現性はマイクロメーターで評価した再現性と比べて悪くなっているが、これはステージ位置の決定精

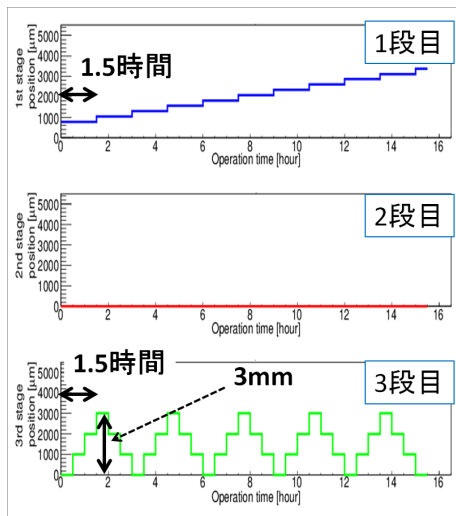


図 6: 常温常圧環境試験タイムスケジュール

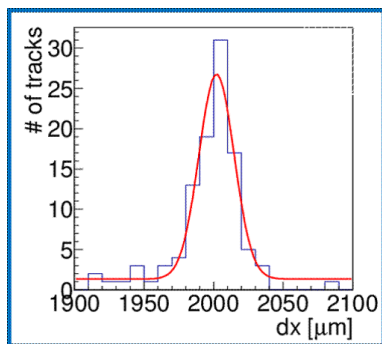


図 7: トラック集団のピーク値評価

度がマイクロメートルでは $1\mu\text{m}$ 以下であったのに対し、エマルジョンの飛跡集団による位置決定精度は $2\mu\text{m}$ 程度であったことが原因であると考えられる。この再現性はトラックのつなぎ精度と比べると小さく、問題ない程度である。

3.4 低温低圧環境試験試験

以上の試験結果より、常温常圧環境下ではシフターは十分な駆動性能を持つことが確認できた。しかし実際にはシフターは気球に搭載し低温低圧環境下 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 5hPa) での動作が求められる。そのため、フライト環境でも正常に動作すること、及びフライト環

境下での再現性の評価を目的として 2013 年 3 月に宇宙研/JAXA にて低温低圧環境試験を実施した。試験時のデータよりシフターが正常に動作したことを確認した。現在、さらなる解析を進めている。

4 まとめ

エマルジョン望遠鏡の構成要素の一つである多段シフターの動作試験を行った。メカニカル試験では $1\mu\text{m}$ 未満の再現性、許容値に収まる等速性をもつことを確認した。つづいて行ったエマルジョンフィルムを用いた再現性の評価では $3.1\mu\text{m}$ というメカニカル試験と矛盾しない結果を得た。これらの結果から常温常圧環境下では十分な動作性能をもつと判断して低温低圧環境試験を実施し現在解析を進めている。

Reference

W.B.Atwood, et al. The Astrophysical Journal, 697(2009)

六條宏紀. 神戸大学修士論文 (2010)