

GRAINE 計画：2018 年豪州気球実験に向けたタイムスタンパーの準備状況

神戸大学 ○呉坪健司, 青木茂樹, 尾崎圭太, 柴山恵美, 鈴木州, 高橋覚, 立石友里恵, 中村崇文, 中村元哉,
 原俊雄, 松田菖汰, 松本明佳, 丸嶋利嗣, 水谷深志, 薮美智, 山田恭平
 愛知教育大学 児玉康一
 ISAS/JAXA 池田忠作, 濱田要
 岡山理科大学 伊代野淳, 松川秋音, 山本紗矢
 名古屋大学 大塚直登, 岡田晟那, 河原宏晃, 駒谷良輔, 小松雅宏, 小宮山将広, 佐藤修, 鳥井茉莉,
 長縄直崇, 中野敏行, 中村光廣, 中村悠哉, 西尾晃, 丹羽公雄, 宮西基明, 森下美沙希,
 森島邦博, 吉本雅浩, 六條宏紀

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。

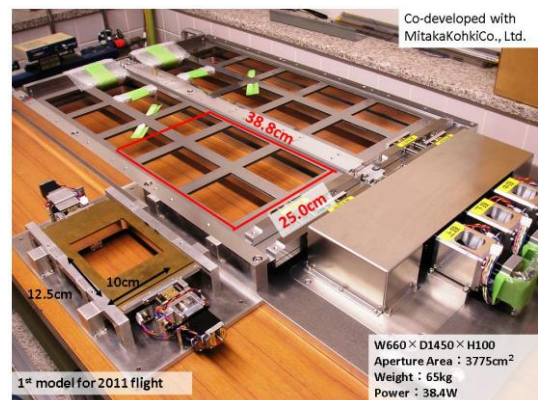
我々は、原子核乾板（エマルジョンフィルム）によるエマルジョン望遠鏡を気球に搭載することで宇宙ガンマ線を観測するGRAINE計画を推進している。エマルジョンフィルムは低物質質量（ $\sim 10\text{-}3X0$ ）かつ高分解能（ $\sim 0.1\ \mu\text{m}$ ）が特徴の三次元飛跡検出器であり、電子対生成反応を精密に測定することで、ガンマ線に対して優れた角度分解能や偏光に対する感度を持つ。本講演では、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部である多段シフターの2018年豪州フライトに向けた準備状況について報告する。

2. タイムスタンパー:多段シフター

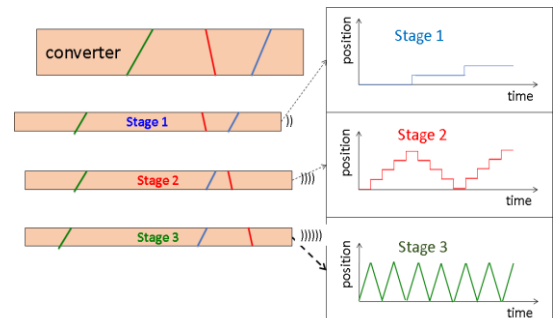
原子核乾板は積分検出器であり、時間情報を持たない。しかし、時刻ごとに天球に対する検出器の姿勢を決定し、宇宙ガンマ線を天球上にポインティングするためには、ガンマ線の到来時刻を決定する必要がある。そこで、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンパーとして多段シフターを採用している(図1)。多段シフターは複数のステージから構成されており、エマルジョンフィルムを搭載した各ステージを独立の周期で駆動させることで、時刻ごとに固有なステージ関係を構成する。解析時には各ステージのフィルムに記録された飛跡をつなぐ際の位置ずれ量から荷電粒子貫通時のステージ関係を再構成し、貫通時の時刻情報を得ることが出来る(図2)。

2.1 多段シフターの実績

多段シフターは神戸大学特任助教の高橋によって提案され、名古屋大学研究員の六條によって実用化された。2011年6月気球実験では口径125cm²の多段シフターが使用され、フライト時間4.3時間(高度34.7kmレベルフライト1.6時間)に成功し、データ解析によるガンマ線の検出



【図1】奥側:多段シフター3780cm²モデル
 手前側:多段シフター125cm²モデル



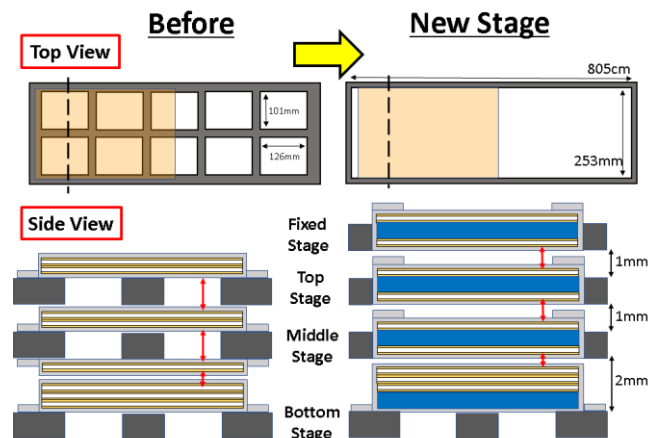
【図2】多段シフターのステージ駆動法概念図

から時刻付与の動作実証がなされた。2015年気球実験では口径3780cm²の多段シフターを使用し、フライト時間14.4時間(高度36.0-37.4km, レベルフライト11.5時間)のフライトに成功した。望遠鏡の改良やオーバーオールの実証を達成した。多段シフターの貫通飛跡に対する時間分解能は17.8ms(<200MeV/c, tanΘ=0.3)、13.4ms(>500MeV/c, tanΘ=0.3)が得られた。しかし、望遠鏡の部分的不具合によりVelaパルサーからのガンマ線を有意に検出はできなかった。2018年気球実験では、Velaパルサーからのガンマ線を有意に検出すること目的として2018年気球実験へ向けた準備を行っている。

2.2 フィルム搭載デザインの改良

多段シフターの貫通飛跡に対するタイムスタンプにおいて、各ステージのフィルムに記録された飛跡を繋ぐ際の信頼性を向上させることが重要である。ステージ間のgapが大きくなると、飛跡の外装による角度の不定性が増加し、つなぎwindow許容値を広げることにより信頼性の悪化につながる。つなぎ信頼性は飛跡の外装距離の2乗に反比例するため、ステージ間のフィルムの距離を短くコントロールすることが重要である。

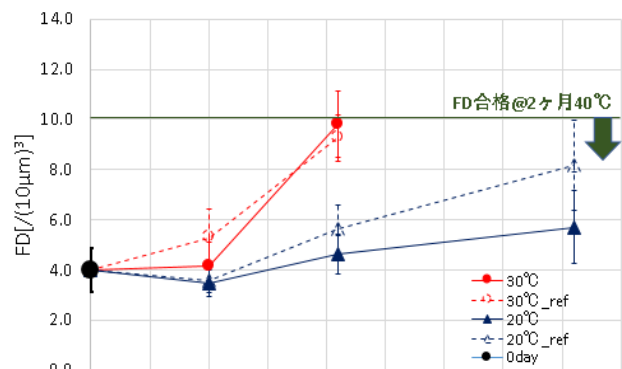
2015年気球実験で使用された多段シフターのフィルム搭載デザインを改良することで、さらなるタイムスタンプ信頼性の向上へ向けた検討を行っている。新型ステージは、ステージ板の開口領域を広げ、有効面積を増加させた(20%@100MeV)。そこへフィルムをはめ込むことでステージ間のフィルムのgapを軽減する(S/N²倍向上)ことが出来る。また、高剛性・低物質量の背板を導入することで、平面性の確保が期待される。また、新たに固定段を追加することで、コンバータフィルムとのgapのコントロールおよび低減(S/N²倍向上)を図っている(図3)。



【図3】多段シフターフィルム搭載デザイン改良イメージ図。左側が改良前、右側が改良後を示している。

3. CFRPケミカル試験

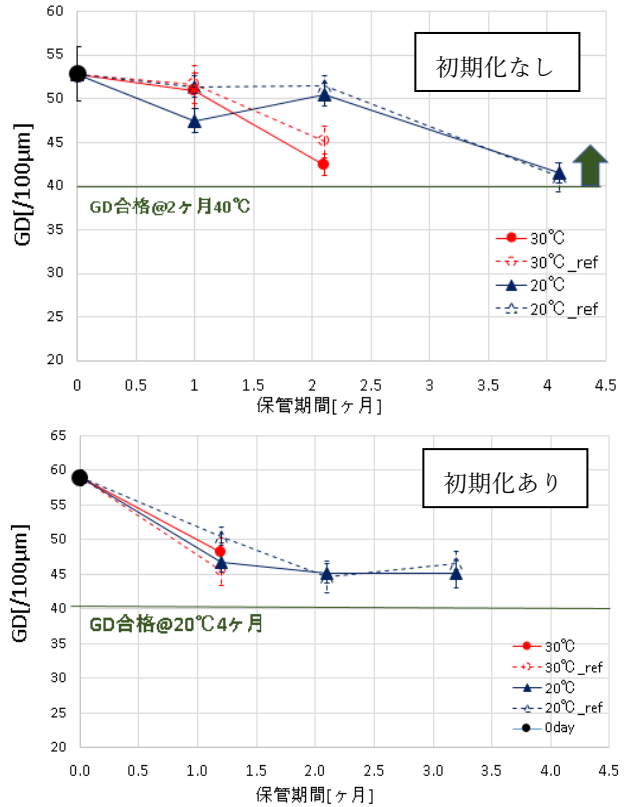
フィルム搭載デザインの改良に伴って導入する背板の条件として、高剛性かつ低物質量な素材が望まれる。そこで今回、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)として導入した。フィルム1枚分の大きさ(250mm×390mm)で厚さが600μmとなっている。自重によるたわみが鉄よりも88%小さく、放射長は鉄の15倍のデザインとなっている。一方、CFRPはエマルジョンフィルムと共に用いた実績がないため、導入可能かを調べるためケミカル試験を実施した。



【図4】CFRPと共に真空パックしたフィルムのFD。色の違いが保管温度条件の違いである。白抜きのプロットは、CFRPを入れずにパックしたサンプルを示している。

CFRPケミカル試験は、CFRPと共に真空パックしたエマルジョンフィルムの長期特性を調べる試験である。エマルジョンフィルムをCFRPと共に真空パック後20°C及び30°Cの温度条件で保管した後、mip相当のβ線照射を行って現像処理をした。照射によって記録された飛跡の線密度をGraineDensity (GD) と呼び、感度の指標として評価した。また、照射起因でないランダムに記録されるノイズの体積密度をFogDensity (FD) として評価した。CFRPを入れずに真空パックしたサンプルと比較してGDの低下やFDの増加は見受けられていない(図4)。

また、エマルジョンフィルムを長期間保存すると感度が低下することが経験的に分かっており、その対策として初期化処理が前回のフライトから採用された。初期化処理とは高湿度条件で24時間フィルムを置くことで低下した感度を復活させることができる。今回、2018年気球実験で使用する中銀フィルムにおいて、初期化処理を行ったフィルム長期特性を調べる試験を行った。その結果、初期化処理をしていないサンプルと比較して初期化処理をしたフィルムの方が、長期的に感度がより高く保たれることが分かった(図5)。

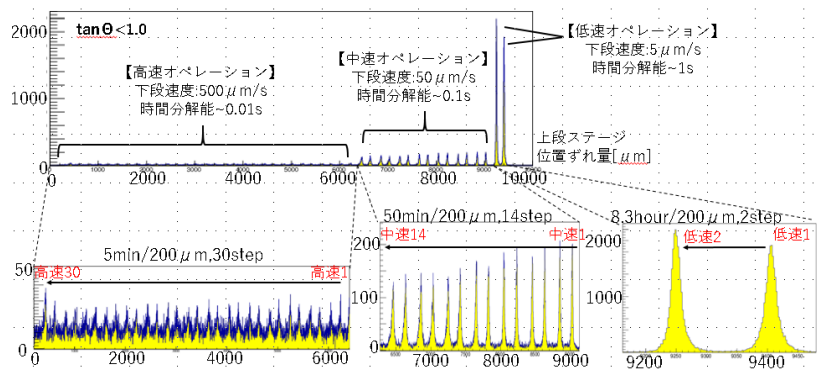


【図5】CFRPと共に真空パックしたフィルムのGD。色の違いが保管温度条件の違いである。白抜きのプロットは、CFRPを入れずにパックしたサンプルを示している。

4. シフター低温低圧環境試験

フィルム搭載デザインの改良後の多段シフターが低温低圧環境下で正常に駆動するかどうかを調べる必要があったため、JAXAにて多段シフターの低温低圧環境試験を実施した。温度および圧力条件は、前回の気球実験で得られたデータを基に設定した。気球実験時を想定したセットアップで背板と共に真空パックしたフィルムを各ステージに搭載し、実験時のオペレーションでシフターを駆動させる宇宙線照射試験を行った。試験終了後フィルムを現像し、名古屋大学のHTSでフィルム内に記録された飛跡の読み出しを行った後、データ解析を行った。

多段シフターのステージに搭載したフィルムのうち、固定段と上段のフィルム内に記録された飛跡を



【図6】固定段・上段のフィルム内に記録された飛跡の分布。横軸は上段のステージ座標と対応しており、各オペレーションにおける上段の駆動に対応した分布が得られている。

接続し、さらに実験時の飛跡集団を選出した結果、各オペレーションに対応した飛跡集団が得られた(図6)。連続駆動する下段の速度を変化させたことで、それぞれ低速・中速・高速の3種類のオペレーション

に起因する宇宙線の飛跡の分布が見えている。各オペレーションにおいて、 $200\mu\text{m}$ 間隔で飛跡が見えているが、これは上段のステップに対応しており、上段が正しく駆動していたことが確認できた。また、固定段と上段のフィルムでつながった飛跡集団のうち、低速オペレーションによる2つの飛跡集団をさらに中段・下段へと接続した結果、中段・下段のステップおよびストロークがオペレーションによる期待値と矛盾しない結果が得られたため、全ての段において正しく動作していたことが、照射飛跡を時間分解することによって確認できた(図7)。

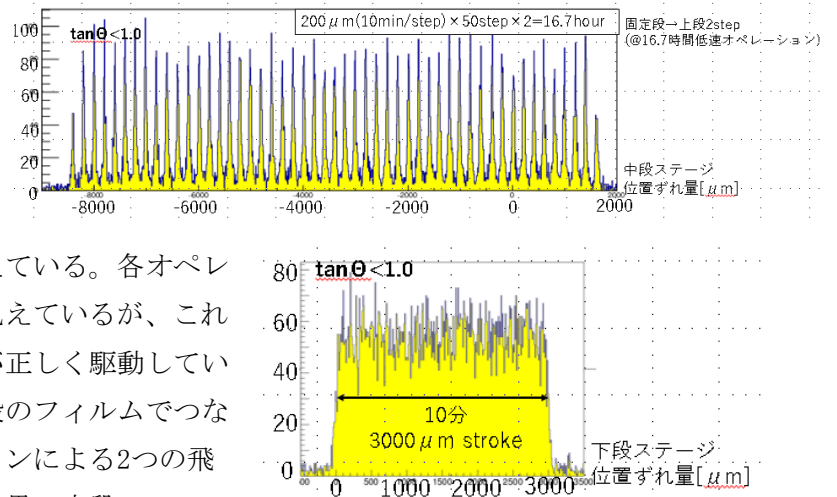
5. まとめと展望

2018年気球実験へ向けた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フィルム搭載デザインの改良を行った。ステージの開口領域を拡大し、フィルムをはめ込むことによってステージ間のgapの制御及び低減が可能となり、S/Nの向上(~ 2 倍)が見込まれている。開口領域の増加によって物質量が小さくなり、有効面積の拡大($20\% @ 100\text{MeV}$)につながる。高剛性の背板CFRPの導入によって、平面性の向上が期待され、固定段の追加によってコンバータ・シフター間のgapの低減によるS/Nの向上(~ 2 倍)が見込まれるデザインである。また、背板CFRPがフィルムに対してネガティブな影響を与えないことを、ケミカル試験を通じて実証した。フィルム搭載デザインの改良後の低温低圧環境でのシフターフィルム搭載駆動試験を行い、各ステージのオペレーションに矛盾しない宇宙線の飛跡集団が得られた。

現在エマルジョンフィルムの製造を予定通り進めており、オーストラリアへ輸出する前にフィルムの初期化処理を行い、乾燥後CFRPと共に真空パックをして輸出をする。

6. 参考文献

- GRAINE collaboration(エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ)2004-2017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



【図7】固定段・上段のフィルム内でつながった飛跡集団のうち、低速オペレーションを中段、下段へと接続することで得られた分布。それぞれステージの駆動に対応した飛跡集団が得られた。