

GRAINE 計画：2018 年気球実験の最新結果報告

神戸大学, 愛知教育大学^A, ISAS/JAXA^B, 岡山理科大学^C, 岐阜大学^D, 名古屋大学^E

○高橋覚, 青木茂樹, 尾崎圭太, 小田美由紀, 加藤拓海, 鳥野純花, 呉坪健司, 佐藤良紀, 柴山恵美, 鈴木州, 立石友里恵, 中村崇文, 中村元哉, 原俊雄, 松田菖汰, 松本稔樹, 松本明佳, 丸嶋利嗣, 水谷深志, 藪美智, 山田恭平, 山本知己, 児玉康一^A, 池田忠作^B, 濱田要^B, 伊代野淳^C, 松川秋音^C, 山本紗矢^C, 仲澤和馬^D, 吉本雅浩^D, 白田育矢^E, 大塚直登^E, 岡田晟那^E, 河原宏晃^E, 駒谷良輔^E, 小松雅宏^E, 小宮山将広^E, 佐藤修^E, 杉村昂^E, 鳥井茉莉有^E, 長縄直崇^E, 中野敏行^E, 中野昇^E, 中村光廣^E, 中村悠哉^E, 西尾晃^E, 丹羽公雄^E, 宮西基明^E, 森下美沙希^E, 森島邦博^E, 六條宏紀^E

1. はじめに

宇宙ガンマ線観測は、宇宙線物理学、高エネルギー天体物理学、宇宙論、基礎物理と多岐にわたる波及効果をもたらす。また近年のニュートリノや重力波も併せたマルチメッセンジャー天文学において、ガンマ線は決定的に重要なメッセンジャーを担う。高エネルギーガンマ線が引き起こす電子対生成反応をエマルジョンフィルムで捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能およびガンマ線偏光に対する感度が実現できる。我々はエマルジョンフィルムから成るガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球フライト繰り返しによる宇宙ガンマ線精密観測を目指す(GRAINE 計画)。

これまでに地上における様々な研究開発やテスト実験、2011 年気球実験(大樹航空宇宙実験場、口径面積 125cm²、総フライト時間 4.3 時間)、2015 年気球実験(豪州、口径面積 3780cm²、総フライト時間 14.4 時間)によって、エマルジョン望遠鏡気球フライトによる宇宙ガンマ線観測の実現可能性を拓いてきた。一方で 2015 年気球実験の目標に挙げていた Vela パルサーからのガンマ線を有意に検出することに関しては、望遠鏡の部分的な不具合があり、有効面積や有効時間そしてバックグラウンドによって制限され未達成となった。

2018 年気球実験では、実験規模(口径面積やフライト時間)は 2015 年気球実験と同規模で、望遠鏡の部分的な不具合を大幅に改善(有効面積・有効時間の拡大およびバックグラウンドの低減に関して計 5 倍の改善に相当(ガンマ線源検出感度にして $\sqrt{5}$ 倍))し、Vela パルサーからのガンマ線を有意に検出し、望遠鏡の総合的な性能実証(目標結像性能 1 度(>100MeV))を目指す。そのために様々な開発・改良・準備をこれまでにこなし、2018 年気球実験を無事に成し遂げた。エマルジョンフィルムの現像までをオーストラリア国内(シドニー大学で自分たちの手で)無事に完了させ、現像後のエマルジョンフィルムやデータストレージディスクを日本に持ち帰り、フライトデータ解析を進めている。2018 年気球実験に向けた開発・改良・準備、気球実験、フライトデータ解析については「GRAINE collaboration、2017-2019 年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照されたい。

2. 2018 年気球実験フライトデータ解析

取りこぼしていたガンマ線事象を拾い上げることによって 20%近くの統計増大を図った。主にはコンバーター-多段シフター間接続について、時間情報も併せた接続によってリカバーした。さらにパイロットスタディによって、現在は保留にしている複数タイムスタンプ事象について、多段シフターにおける飛跡再構成の指標を総合的に判断し、タイムスタンプを一意に決めることによって、タイムスタンプ信頼性 2%低下で統計 10%向上がまだまだ図れることがわかっている。また検出器内で発生しているガンマ線事象等について、時間情報を併せることによって識別し、バックグラウンドを 50%程度削減した。現状、多段シフターのデータ処理エッジでの識別損失が 3%あり、データ処理エッジの取り扱いを適切にすることによって識別損失 3%はリカバーできる。また識別した事象は主にハドロン反応起因ガンマ線事象とハドロン反応事象(再構成失敗による誤検出)である。これらのハドロン反応起因事象については現状で少なくとも荷電粒子飛跡 2 本(ガンマ線事象の電子対飛跡を除く)まで識別を達成した。さらに詳細な解析を加えることによって、荷電粒子飛跡 1 本まで識別可能であり、さらに 11%の削減が期待できる(荷電粒子本数閾値分析より)。またパイロットスタディによって電子起因ガンマ線事象が 4%存在していることがわかっている。これらを一通り併せると、バックグラウンド削減について 70%程度まで削減が見込める。図 1 に以前の版に対する統計増大率とバックグラウンド削減率を最新版と見込みについてそれぞれ示す。

統計増大・バックグラウンド削減によって、検出器軸のオフセットの分析が可能となった。検出器角度空間において、Vela パルサーに対するガンマ線の角度ずれを注意深く詳細に分析することによって、検出器天頂軸周りの回転や、天頂軸の伸縮や傾きを見出すことができた。そしてそれぞれに対して最大 1deg スケールの補正を施した。

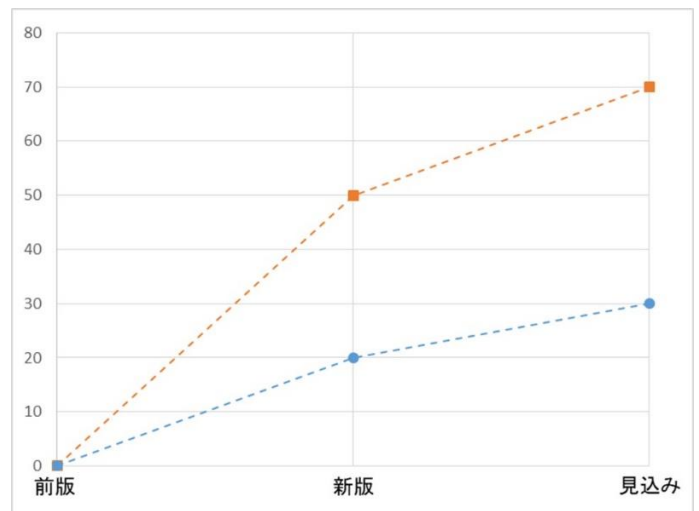


図 1：以前の版に対する統計増大率%(青丸)とバックグラウンド削減率%(橙四角)を最新版と見込みについてそれぞれ表す。

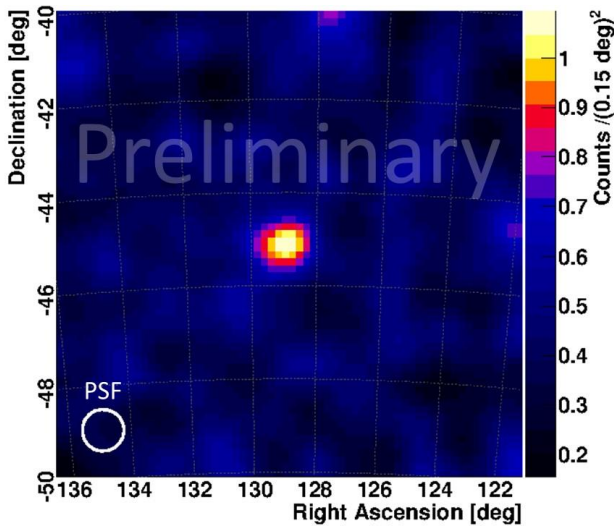


図 2 : Vela パルサー周辺におけるガンマ線到来方向分布(赤道座標、>80MeV、平滑化あり)

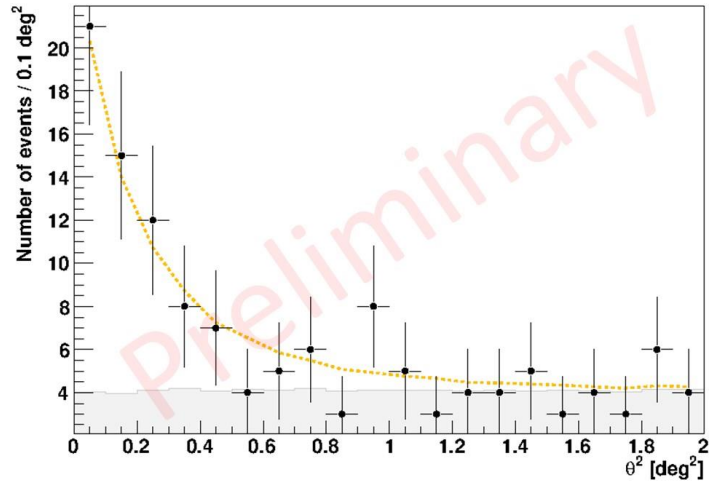


図 3: Radial 分布(横軸は Vela パルサーに対する角度 θ の二乗、>80MeV)。点源を仮定したシミュレーション(橙破線)をバックグラウンド(灰)と併せて示す。

統計増大、バックグラウンド削減、検出器軸オフセット補正後の Vela パルサー周辺のカウントマップを図 2 に示す。また図 3 に Vela パルサーに対する radial 分布を示す。統計的な有意度として 11.2σ となる確固たる検出を達成した。また像の広がりには 68% 含有半径にして $0.45^{+0.14}_{-0.09} \text{deg}$ が得られた。また得られた像は点源を仮定したシミュレーションとコンシステントであった。

また今回の exposure ではあまり精度は出ないが、エネルギースペクトルを導出した(図 4)。導出したスペクトルはこれまでの観測とコンシステントであった。現状の精度は統計誤差が支配的なので、exposure を稼いでいけば改善可能である。またさらに高エネルギー側(GeV 帯域)や低エネルギー側(10MeV 帯域)にも伸ばしていける。エマルジョンガンマ線望遠鏡におけるスペクトル測定では、例えば世界最高解像度による Galactic diffuse の混入を劇的に抑えた測定が可能となる。

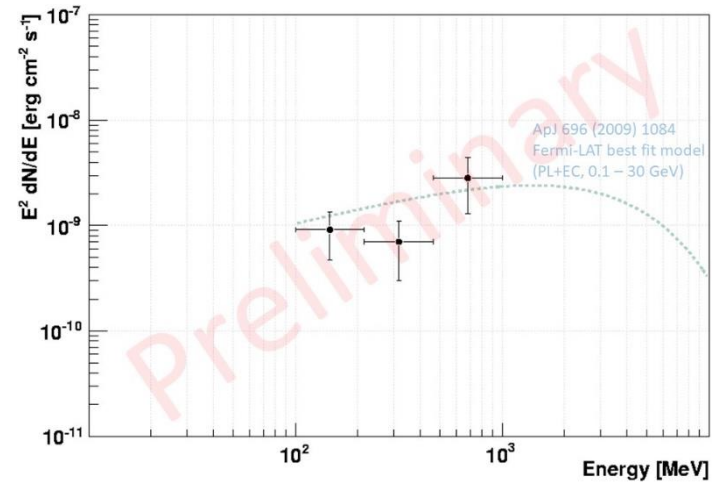


図 4 : スペクトルエネルギー分布。これまでの観測結果(水色破線)を併せて示す。

またその他にも、エマルジョンガンマ線望遠鏡にとって主要なバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測を進めている。大気ガンマ線実測はバックグラウンドの理解だけでなく、検出器応答の理解にもつながる。また大気ガンマ線は、一次宇宙線・太陽活動・地磁気・大気・二次粒子の情報を含んでおり、それらへ波及する大気ガンマ線物理を展開可能である。例えばニュートリノ物理への貢献可能性も考えられる。気球高度における sub-GeV 帯域のガンマ線というところが特にユニークな点である。大気ガンマ線の直接観測は気球実験において大きな強みがある。

大気ガンマ線実測では具体的にはフラックスや東西効果を測定している。特に東西効果については、恐らく世界で初めて気球高度における大気ガンマ線東西効果の検出に成功した(調べた範囲内では過去にそのような測定は見当たらなかった)。実際には当初、Vela パルサー像が全然浮かび上がってこなかったため、ガンマ線到来方向決定の正しさを検証する必要が出てきた。大気ガンマ線は一次宇宙線に準じた東西効果を持つと考え、大気ガンマ線東西効果の検出を試みた。注意深い詳細な解析による試行錯誤の末、データに内在していた不具合をえぐり出すことに成功し、大気ガンマ線東西効果を検出するとともに、Vela パルサー像を浮かび上がらせることに成功した。また大気ガンマ線東西効果の検出は、ガンマ線到来方向決定の正しさを検証できるだけでなく、宇宙ガンマ線の主要なバックグラウンドとなる大気ガンマ線の到来方向分布の理解につながる。大気ガンマ線到来方向分布の理解の精度は、宇宙ガンマ線の検出感度を定める(特に拡がった放射)。

大気ガンマ線東西効果の理解を進めるために、大気ニュートリノフラックス計算でも知られる HKKM モデル計算[Honda et al., Phys. Rev. D 92 (2015) 023004]を本田守弘氏(東大宇宙線研)らの協力を得て、計算パラメータ(太陽活動期、緯度経度、残留大気など)を 2018 年気球実験に合わせて計算をおこない、大気ガンマ線東西効果データとの比較を進めた(図 5)。大気ガンマ線東西効果データと計算結果は 5% 以下で一致を得た。一方で、詳細(5% 以下)には系統的なずれが見えており、データと計算の双方から理解を進めていく。またデータでは緯度・経度の移り変わりによって大気ガンマ線東西効果の変動が見えており、計算では追えない変動が見えている可能性があり大変興味深く、理解を進めていく。

2022年気球実験では異なる太陽活動期にさらに詳細なデータが得られ、ますます理解を進めることができる。また様々な緯度・経度・高度や太陽活動期における網羅的なデータ取得による総合的な理解へと発展を目指す。また大気ガンマ線の詳細な理解は大気ニュートリノの理解にもつながる。Hyper-Kamiokandeなどの次世代ニュートリノ実験への貢献可能性の検討も進めていく。

銀河面放射を探索するため、検出した大気ガンマ線東西効果データを基にバックグラウンドをモデリングした。データからバックグラウンドモデルを差し引いた銀緯分布を図6に示す。まず銀河面(-5<銀緯[deg]<5)以外の領域において、データとバックグラウンドモデルとの間で、統計誤差に相当する1%程度の精度での理解を達成した。そのうえで銀河面領域を見てみると2 σ を超える超過(2%強)が見えており、銀河面放射の兆候を捉えた。超過量についても期待される銀河面放射強度とコンシステントである。銀河中心領域であれば放射強度は3倍程度になるため、今回の口径面積0.38m²でも5 σ 以上での検出は十分可能である。さらに2022年気球実験ではフライト機会にもよるが、口径面積2.5m²(6.6倍)で2機(回)のフライトを予定しており、最大で13倍の光子収量となる。2022年気球実験で銀河中心領域をカバーするフライトが達成できれば、世界最高解像度での詳細な分析(例えば空間構造など)が可能となる。また放射強度は劣るが銀河面放射についても、今回より明かな検出および詳細な分析が可能となる。

また2018年気球実験では従来の原子核乾板検出器では全く不可能であった検出器全体に降り注ぐハドロンシャワー飛跡1本1本を時間情報を併せることによって捉えられるようになってきた(図7)。検出器全体に降り注ぐハドロンシャワーを捉えることによって、口径面積を拡大した際に検出器全体にわたる新たな校正用線源となり得るだけでなく、荷電粒子との同期による大気ガンマ線の識別可能性も出てくるなど、新しい可能性を拓いている。2022年気球実験では時間分解能の向上も図り、さらにキレのある検出が可能となり、新たなデータ解析を拓く。

3. まとめと展望

2018年気球実験を無事に成し遂げた。Velaパルサーについて11.2 σ となる確固たる検出を達成した。またその像広がりについて68%含有半径にして0.45degを得た。世界最高解像度でのVelaパルサーの撮像を達成し(従来に対して立体角で10倍以上)、世界最高角度分解能を実現するエマルジョンガンマ線望遠鏡を確立した。また銀河面放射を探索しその兆候を捉えた。その他にも大気ガンマ線実測を進め、特に恐らく世界初となる気球高度における大気ガンマ線東西効果を検出した。また検出器全体に降り注ぐハドロンシャワーを捉えられるようになってきた。2018年気球実験の最低成功基準「同じ検出器面積による2015年観測での設計値と同等以上の性能を発揮していることを検証すること」、高度成功基準「ガンマ線源Vela pulsarを有意に検出すること」、最高度成功基準「Vela pulsarを精密撮像すること」を達成した。また最高度成功基準に挙げていた「他ガンマ線源(銀河面放射など)を検出もしくは兆候を捉えること」についても達成した。総じて2018年気球実験を大成功に収めた。

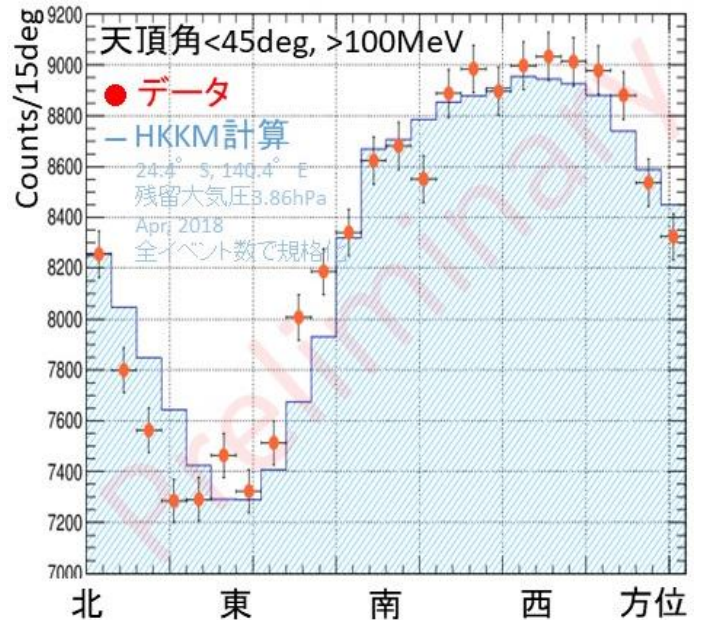


図5: 大気ガンマ線東西効果のデータとHKKM計算の比較。

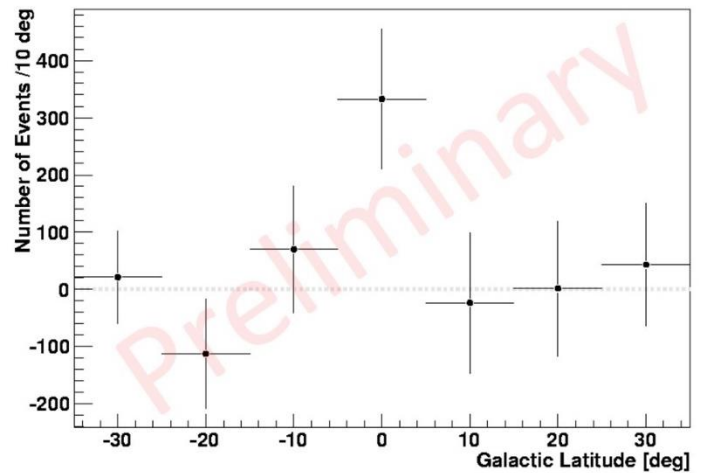


図6: データからバックグラウンドモデルを差し引いた銀緯分布(>80MeV、~300<銀緯[deg]<~200、Velaパルサー領域は除く、検出器天頂角<45deg)。縦の誤差棒は統計誤差を表す。

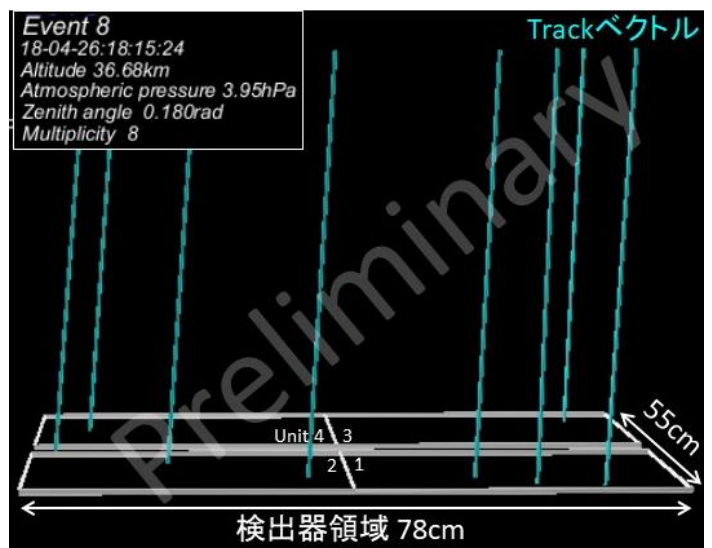


図7: 検出器全体に降り注ぐハドロンシャワー事象候補の1例。

2018年気球実験の経験・実績に基づき、口径面積・フライト時間の拡大を図っていき、本格的な科学観測の開始を目指す。そのためのコミショニングとして2022年気球実験(新型コロナウイルスの影響により2021年気球実験が延期)では口径面積2.5m²・フライト時間1日程度の気球実験2回を予定している。2022年気球実験では世界最大口径面積のガンマ線遠望鏡の実現を目指すとともに、Velaパルサーについてさらに高エネルギー側(>GeV)でも観測することによって、さらに一回り高い角度分解能の実証を目指す。また低エネルギー側についても電子対生成反応が支配的な10MeV程度までの観測性能を探る。そして世界で初めてとなる偏光有感での観測を開始する。またフライト機会に恵まれれば銀河中心領域を観測する。銀河中心領域はガンマ線源が混みあっており、高角度分解能観測がものを言う。新しいガンマ線源の発見の可能性も出てくる。また活動銀河核フレアなどのトランジェントについて2例程度が観測にかかることが期待できる(フェルミ望遠鏡の観測実績に基づく)。トランジェント観測における感度や光子収量は口径面積がものを言う。またその他の明るいガンマ線源(銀河面放射、Geminga、PSRJ1709-4429、3C454.3、Crab、Moon、PKS1510-08、W44、Sun)について検出もしくは兆候を捉え観測の開始を目指す。

現在そのための準備や開発を進めており、エマルシオンフィルム量産体制づくり、大口径面積・長時間・高時間分解能を実現する時刻付与機構多段シフターの開発、大型軽量与圧容器ゴンドラの開発、大規模現像施設を利用した大量現像処理目途、さらに高速なエマルシオン飛跡読取装置の開発などが進行中であり、「GRAINE collaboration、2019・2020年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照されたい。例えば多段シフターの開発については、従来のステージ駆動型からローラー駆動型にすることによって、簡素な構成となり、大幅な軽量化が図れ、大口径面積を実現できる。併せて段間距離(飛跡外挿距離)を詰められ且つ段数を増やすことができ、長時間・高時間分解能・低エネルギー閾値が実現できる。従来の多段シフター開発と同様に三鷹光器社との共同開発によって、ローラー駆動型多段シフターの単段試作機(2014年10月)や固定段+5段試作機(2018年8月)をそれぞれ試作し、ローラー駆動型多段シフターの実現可能性を実証してきた。2019年度(2019年11月)には、フライトモデル初号機を製作(図8)し、従来型に比べ口径面積あたりの重量にして約3分の1となる大幅な軽量化を達成し、大口径面積実現の見通しが立ってきた。フライトモデルの動作・性能試験や環境試験を進めていき、2022年気球実験へ実装を目指す。その中でも多段シフターにおいて肝心要となるエマルシオンフィルムの真空パックについて、ダミーフィルムでの試作を繰り返した。またパック材をいくつか試し動作試験をおこなった。また新メンバー(東崇史、山下真優(神戸大学3回生))も交えながら、機械的な基礎特性(摩擦やトルクなど様々)について実測ベースでの基礎理解も進めている。

2018年気球実験で培った経験・実績を基に、これまでに中型真空包装机(2018年気球実験多段シフターのエマルシオンフィルムを真空パックするために導入)を流用し、現状で900mm×300mmの中判真空パックを確立した。また特注大型真空包装机の導入を進めており、気球実験において世界最大となる1270mm×1020mmの大判真空パックの実現を目指す。また大判真空パック作業のための暗室環境や、多段シフターフライトモデルの動作試験を順次進めていくための作業環境の立ち上げも進めている。また気球実験への実装にあたり、周辺回路(テレメトリ関連、コマンド・GPSPPS関連、ハウスキーピング関連、電源回路関連等)のアップグレードを進めており、設計・試作・動作確認が完了しつつある。



図8：ローラー駆動型多段シフターフライトモデル初号機

参考文献

GRAINE collaboration (エマルシオンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2020年度大気球シンポジウム集録.
 S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 37 (2006) 2120.
 S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620 (2010) 192.
 H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701 (2013) 127.
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.
 K. Ozaki et al., JINST 10 (2015) P12018.
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.
 K. Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 833 (2016) 165.
 高橋 覚、青木 茂樹、日本物理学会誌 72 巻 10 号(2017) 734.
 S. Takahashi, S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 62 (2018) 2945.
 K. Yamada et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2017) 063H02.
 H. Rokujo, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2018) 063H01.
http://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2018_07_17_02.html
 青木 茂樹、高橋 覚、六條 宏紀、他、RADIOISOTOPES 68 (2019) 877.
 H. Rokujo et al., JINST 14 (2019) P09009.