

GRAINE 大面積科学観測を実現する 長繭型与圧容器ゴンドラの開発状況

名古屋大学 ○小宮山 将広, 大塚 直登, 岡田 晟那, 河原 宏晃, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, 佐藤 修, 杉村 昂, 鳥井 茉有, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中野 昇, 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

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

神戸大学 青木 茂樹, 尾崎 圭太, 小田 美由紀, 烏野 絢花, 呉坪 健司, 佐藤 良紀, 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 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

1 はじめに

天体での粒子加速に伴い生じるガンマ線は、磁場の影響を受けず空間を直進するため、宇宙から到来するガンマ線を観測することは、宇宙での高エネルギー事象を研究する上での重要な手段となる。ガンマ線観測は技術的な困難から長らく発展しなかったが、2008年に打ち上げられた Fermi 衛星 LAT 検出器 (以後 Fermi-LAT) が全天観測を行い、5000 以上ものガンマ線天体を検出した。Fermi-LAT の観測結果からガンマ線による天体の観測数は大幅に向上した。さらに、それまでの GeV 帯のガンマ線観測実験と比較して高い角度決定精度を持ち、各天体のイメージング画像の高解像度化にも成功した。しかし、ガンマ線天体観測においてはまだ課題が残っている。一つは Fermi-LAT の検出器構造ではガンマ線の偏光観測が不可能という点である。もう一つは、Fermi-LAT によって観測された天体のおよそ 3 割が他の波長域との対応が取れない未同定天体であるという点である。このような未同定天体は拡散成分や天体が複雑に密集している銀河面領域に集中しており、この帯域の観測は他波長域に比べて角度分解能が劣っているために天体の分離が上手く出来ていない。そのためガンマ線天体観測において、統計量の改善だけでなく観測データの質的な向上が求められている。

2 GRAINE 計画

GRAINE 計画は優れた空間分解能をもつ飛跡検出器である原子核乾板からなるエマルジョン望遠鏡を気球に搭載し宇宙ガンマ線の精密観測を行う計画である。原子核乾板は直径 200 nm の臭化銀結晶がゼラチン中に充填された乳剤を透明な支持体 (ポリスチレンベース) の両面に塗布したものである。臭化銀結晶中を荷電粒子が通過すると結晶中の銀イオンは銀に還元される。これに現像処理を施すことでサブミクロンの銀粒子の連なった 3 次元的な飛跡として読み取ることができる。10 MeV ~ 数 10 GeV ガンマ線が乾板内で起こす電子対生成反応を精密測定することで、Fermi-LAT と比較して 1 桁近く優れた角度分解能を実現し、ガンマ線の直線偏光に対する感度も有する。

エマルジョン望遠鏡は、コンバータ、タイムスタンプ、姿勢モニタからなる。コンバータは原子核乾板を 100 枚積層させたエマルジョンチェンバからなっており、コンバータで電子対生成反応の飛跡 (角度情報、エネルギー情報、偏向情報) を検出し、この事象に対して、多段シフタ機構からなるタイムスタンプで入射時刻を付与し、姿勢モニタの情報から天球に対する飛来方向を決定することができる。

初めてのフライトである 2011 年の気球実験では、これらの連動試験を成功させ、気球高度におけるガンマ線の飛来方向の決定までの原理実証を成功させた。2015 年の豪州気球実験では、望遠鏡の大幅な改良や性能実証を達成した。2018 年の豪州気球実験では、ガンマ線天体 Vela pulsar (角度分解能 $1.0^\circ @100\text{MeV}$) を有意に検出し、望遠鏡の総合的な性能を実証することを目的として実施した。これについては、現在解析が進行している [1]。

将来的には有感面積 10 平米の検出器を搭載した大口径望遠鏡による複数日間の科学観測を実現し、統計情報を蓄積するとともにガンマ線バーストなどの突発事象に対する感度も高める。

3 風船式与圧容器ゴンドラ

風船式与圧容器 (図 1) はエマルジョンチェンバを真空パックする目的で、2015 年実験で初めて開発・導入した [2]。真空パックのメリットは、平面性の確保、スリップ現象の防止、湿度の保持、フィルムの保護などがあげられる。真空パックを十分に維持するためには、隣り合うフィルムに 1℃の温度差があった場合の伸縮を十分に押さえつける圧力として 100 hPa 以上の圧力を観測時間全域にわたって保持することが要求される。

GRAINE で採用している風船式与圧容器は、内側の気密膜 (ポリエチレンまたは天然ゴム) に空気を封入し、外側のシェル (合成繊維に樹脂をコーティングした膜材料) で押さえつける二重膜構造になっている (図 2)。気密膜とメインリングのパッキンにはシリコンゴムチューブを用いている。この手法で目標の圧力を保持できることが再現性もかねて実証されている。



図 1: 2015 年気球実験で用いた与圧容器ゴンドラ

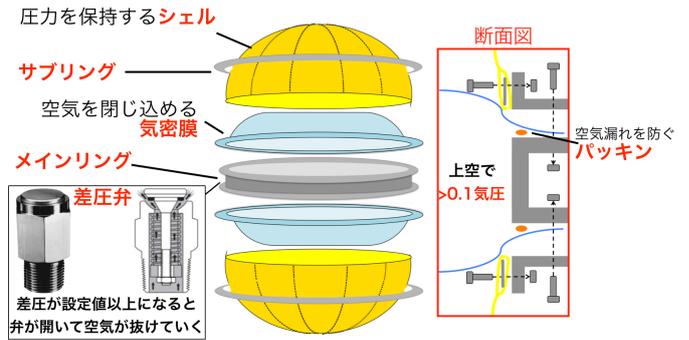


図 2: 風船式与圧容器の構造

風船式与圧容器ゴンドラを初めて導入した 2015 年実験では、フライト全時間帯において 100hPa 以上の圧力を保持することに成功した。先に述べた与圧機構をグループ内で確立した。一方で、JAXA の大型恒温槽での密閉性能環境試験において、観測環境で予想される最低温度 -60℃で密閉性能が急激に低下した。このことから、断熱を強化することでこれを防止した [3]。

2018 年実験の観測規模は 2015 年実験と同じであったが、2018 年実験の与圧容器ゴンドラ (図 3) は、2015 年実験で用いた与圧容器ゴンドラの基本的な構造を踏襲しつつも、将来の大面积実験を見据え、いくつかの改良を施して製作した。その中でも大きな変更点は、2015 年実験用与圧容器ゴンドラの形が「球」であるのに対して、2018 年実験用与圧容器ゴンドラの形を「繭」に変更したことである。これは将来計画として、図 4 のような長繭型に面積を拡大した与圧容器の製作・運用を想定しているためである。繭型の風船式与圧容器は世界初であり、内圧に対する応答など繭型与圧容器ゴンドラについての理解が進んだ。さらに、-60℃での密閉性能の悪化の原因が、エレキコネクタに使われていたパッキンの低温劣化であることを突き止め、-60℃でも常温と同様の弾性を示すパッキンを選定した [4]。これにより密閉性能の温度特性が改善し、余分な断熱を必要としなくなった。2018 年実験では、2015 年実験よりも長時間飛翔したが、想定通りの性能で運用でき、繭型の風船式与圧容器を気球環境における与圧観測プラットフォームとして確立させた [5, 6]。

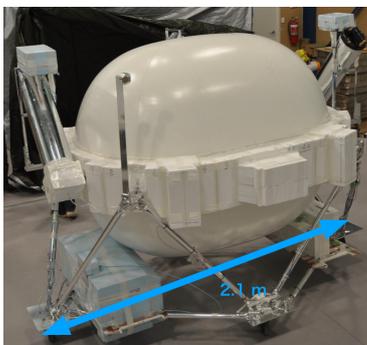


図 3: 2018 年モデルの実機 (フライト前)

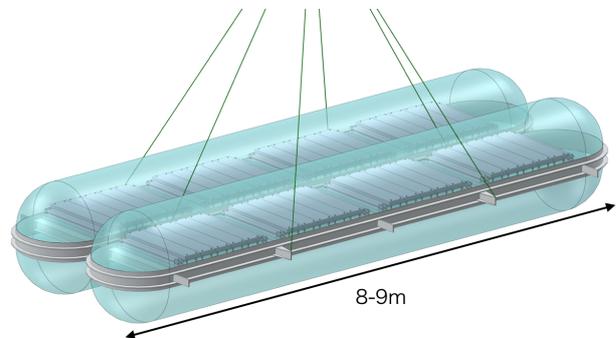


図 4: GRAINE10 平米望遠鏡のイメージ図 (案)

4 長繭型与圧容器ゴンドラの開発状況

4.1 2021 年海外気球実験

GRAINE では 2021 年海外気球実験において、銀河中心方向の GeV ガンマ線の観測、sub-GeV 帯域で初となる偏光有感観測、突発発光現象の高感度観測を目的として、観測面積 5 平米の望遠鏡で複数日間の気球フライトによる科学観測を目指している [7]。すでに大量の原子核乾板の供給・現像・読取・解析の体制の整備、新型シフタの開発および評価を進めている [7, 8]。本節では、この大面積科学観測を実現する長繭型与圧容器ゴンドラの開発状況について述べる。

4.2 長繭型与圧容器ゴンドラの設計と強度

5 平米の観測面積を実現する長繭型与圧容器ゴンドラを図 5 に示す。球型を大きくして観測面積を増やすよりも、繭型に伸ばして観測面積を増やす方が、ゴンドラ重量に対する観測面積は有利になる。2018 年実験用のゴンドラと比べると、吊り点の数が同じなのに対して重量が 2 倍以上増えたことと、吊り点の間隔が長くなったことにより水平方向にかかる力も強くなった。これらは、吊り部の構造を図 6 のようにすることで解決し、全体の 10G 静荷重で応力解析した結果では、破断は見られなかった。また、吊り部について実際よりも厳しい拘束条件で応力解析した結果でも破断しないことを確かめた。これらは溶接加工が想定通りになっていることが条件となるため、吊り部のパーツを製作し、実際に引っ張り強度試験を実施した。製作にあたっては、同時に溶接手順書を作成した。その結果を図 7 に示す。10G の静荷重解析では、吊り点はそれぞれ 34 kN の力で引っ張られる。図 7 より、34 kN 以上でも破断が見られないことを実試験によって確認し、長繭型与圧容器ゴンドラが気球実験に十分な強度を持っていることを確かめた。

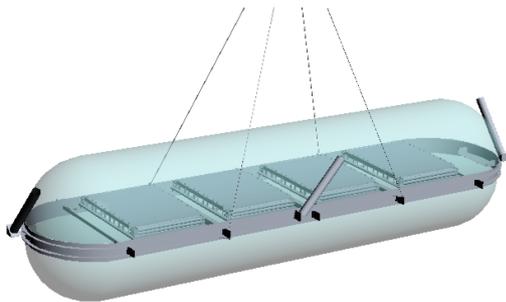


図 5: GRAINE2021 長繭型与圧容器ゴンドラ (案)

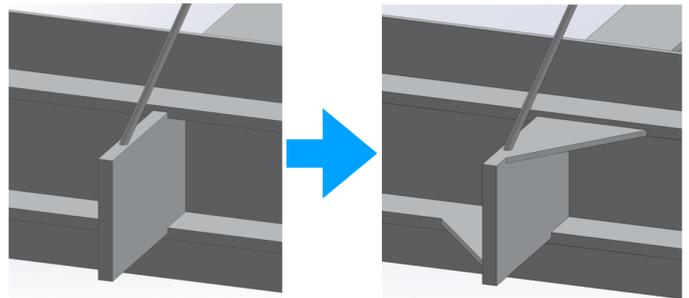


図 6: 吊り部の形状の変更

4.3 望遠鏡重量とゴンドラの軽量化

2021 年実験を気球 B500B を使用して 35km 以上で観測するための望遠鏡の目標重量のうち、ゴンドラの目標重量は 250 kg である。初期設計での重量は 292 kg であったが、応力のかかっていない一部のフレームの体積を削減することで約 12 kg の減量、リング状のフレームのエッジ 10 mm を削減することで約 12 kg の減量、メインリングとサブリングの締結ボルトの位置および間隔を最適化することで約 6 kg の減量、合計で約 30 kg の減量を達成する見込みである。また、これら減量後の 10G 静荷重で応力解析した結果でも破断がないことを確認した。さらに、シェルについても軽量化の検討を行った。シェルの構成比率を最適化することで、強度を落とさずに重量を 3分の2以下に抑えられる見込みがあり、現在、企業と共同開発を進めている。軽量化前のシェル重量は約 64 kg だったため、約 20 kg の減量を達成する見込みである。これらの軽量化により、ゴンドラの目標重量を達成する見込みが立っている。観測面積に対するゴンドラ重量では、2018 年実験が 382 kg/平米に対して、今回設計したものが 48 kg/平米であり、約 8分の1を達成している。

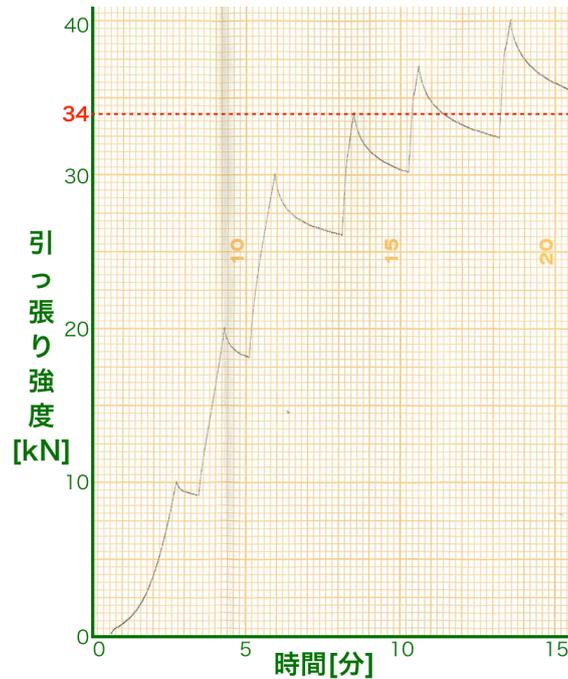


図 7: 吊り部の引っ張り強度試験の結果。10 mm/min の速度で引っ張った。10 kN、20 kN、30 kN、34 kN、37 kN、40kN を超えたところで一度引っ張りを止めている。

5 まとめ

GRAINE では気球搭載型エマルジョン望遠鏡による GeV/sub-GeV ガンマ線の観測を目指しており、2021 年海外気球実験に向けてすでに準備を進めている。

2021 年気球実験に向けては、観測面積 5 平米の長繭型与圧容器ゴンドラの設計を進めている。開傘時にかかる 10G の応力解析を行い、クリアした。負荷がかかる溶接部分である吊り部について、実際に引っ張り強度試験を行い、破断しないことを確認した。重量については、パーツごとの軽量化によって目標を実現できる見込みが立っている。

謝辞

吊り部の引っ張り強度試験を行うにあたって、名古屋市工業研究所にご協力いただきました。

参考文献

- [1] 高橋 覚 他., GRAINE2018:フライトデータ解析報告, isas19-sbs-035.
- [2] 六條 宏紀 他., GRAINE 計画:オーストラリア実験の準備状況 1, isas14-sbs-004.
- [3] 柴山 恵美 他., GRAINE2015 豪州気球実験 風船型圧力容器の開発およびその熱設計, isas15-sbs-030.
- [4] 小宮山 将広 他., GRAINE 計画:2018 年豪州気球実験に向けた与圧容器ゴンドラ準備状況, isas17-sbs-036.
- [5] 小宮山 将広 他., GRAINE2018:与圧容器ゴンドラの開発とフライト結果, isas18-sbs-015.
- [6] H.Rokujo et al., September 2019. Development of a balloon-style pressure vessel gondola for balloon-borne emulsion gamma-ray telescopes. JINST, 14 P09009
- [7] 青木 茂樹 他., GRAINE 計画:ロードマップと次期豪州気球実験, isas19-sbs-036.
- [8] 小田 美由紀 他., 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, isas19-sbs-037.