

## GRAINE 2015 豪州気球実験風船型圧力容器の開発およびその熱設計

○柴山恵美（神戸大学）for the GRAINE collaboration

愛知教育大, ISAS/JAXA, 宇都宮大, 岡山理科大, 神戸大, 名古屋大

### 1. はじめに

ガンマ線天文学は、宇宙の高エネルギー現象を探る有力な手段である。2008年に打ち上げられたガンマ線宇宙観測衛星 Fermi の LAT 検出器によってこれまで4年間の観測で3000天体以上が報告されており、ガンマ線天文学は大きな進歩を遂げてきた。宇宙線研究においては、宇宙線加速天体として有力候補であるとされる超新星残骸についての観測が進み、加速された宇宙線陽子が超新星残骸近傍の星間物質と相互作用して発生する  $n^0$  起因のガンマ線が観測された。今後の課題としては対象天体のより詳細な空間構造の把握、低エネルギー側での精密なエネルギースペクトルの獲得、および天体の周辺磁場の状況を知ることが挙げられる。

こうした課題に、GRAINE 計画 (Gamma-ray Astro Imager with Nuclear Emulsion) は原子核乾板で挑む。原子核乾板はサブミクロンの位置分解能をもち、荷電粒子の飛跡を3次元的に記録できる飛跡検出器である。これを望遠鏡本体として気球に搭載し、大気トップで観測を行う。LAT 検出器に比べて、対生成点直下での到来方向決定が可能であり、約一桁近く角度分解能を向上できる。また、アジマス角を精密に測定することで偏光観測も可能である。

GRAINE 計画は2011年に大樹町において125cm<sup>2</sup>望遠鏡でファーストフライト行い、各部動作を確認し、バックグラウンドとなる大気ガンマフラックスを測定した。2015年5月12日にはセカンドフライトとして面積を約30倍に拡大した3800cm<sup>2</sup>の望遠鏡でオーストラリアにて初の天体観測を実施した。最終的には10m<sup>2</sup>の望遠鏡での科学観測を目指している。本発表では、2015年フライト (GRAINE2015) における、望遠鏡本体を搭載したゴンドラおよび圧力容器のデザイン・製作と、ゴンドラ・圧力容器全体の熱設計・断熱処置について発表を行う。

### 2. 圧力容器のデザイン・製作

望遠鏡本体を構成するエマルションフィルムは、各部真空パックされて搭載される。フィルムを外的環境から保護する遮光・防水と、フィルム性能を保持する低湿度維持、フィルム同士のずれを防止し観測の精度を保証するためのチェンバー全体の一様な押さえこみ・形状保持といった3つの目的がある。GRAINE2015のコンバーター部では、厚み0.3mmのフィルムを1unit100枚まとめて真空パックして使用した。

圧力容器は、容器本体起因のハドロン反応やガンマ線吸収を抑えるため、ATICグループの風船式圧力容器を参考に開発を行った。必要強度である0.3気圧=120Nに耐えうる条件を満たし、複数回の加圧試験を経ても破断しない素材の選定を行った結果、太陽工業株式会社と共同で塩ビコーティングポリエステル繊維の圧力容器シェルを製作した。さらに、パッキンとしてシリコンゴムチューブを二周させる(図2)ことで真空パック維持に必要な0.1気圧以上を保てるようになり、低温試験(図1)においても-40℃まで圧力維持を確認できた。(図3)

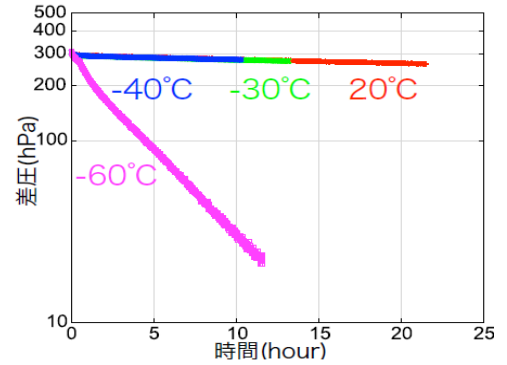


図 1 : 低温試験を行った JAXA 恒温槽

図 2 : パッキン

図 3 : 加圧試験結果

### 3. ゴンドラ全体の熱設計

圧力容器の熱特性を考えるうえで、圧力容器がその性能を保持できる保証温度内に収まることが重要である。低温側は前述のように加圧試験結果から $-40^{\circ}\text{C}$ がリミットである。一方高温側では、塩ビコーティングポリエステル繊維の溶着部で $45^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ で剥がれが確認された。常温での加圧試験時は問題が生じなかったことから、圧力容器の性能保証温度の高温側リミットは $20^{\circ}\text{C}$ とした。気球フライトは高度 $37\text{km}$ を昼夜にまたがって飛翔するため、長時間特殊な熱環境にさらされる。そのため、本計画では初めてとなる熱設計に基づく断熱処置を行うこととなった。

熱設計を行うにあたり考慮した熱環境は、太陽光入射、地球赤外放射、地球アルベドである。これに加え、圧力容器内部の内部発熱や上昇時の対流を考慮した。ゴンドラ各部の素材や断熱に使用する素材の太陽光吸収率 ( $\alpha$ ) や全半球放射率 ( $\epsilon$ ) は JAXA の TESA2000 (図 4) を用いて測定し、以下の値を用いることとした。

表 1 : 各素材の  $\alpha \cdot \epsilon$  測定値

素材	$\alpha$	$\epsilon$
アルミニウム (無垢)	0.24	0.03
アルミニウム (白塗装)	0.27	0.89
アルミ蒸着テープ	0.155	0.673
ガラステープ貼付 発泡ポリスチレン	0.266	0.899
塩ビコーティングポリエステル繊維	0.243	0.96



図 4 : TESA2000

熱設計は、系全体で考える必要があるため、ゴンドラ・圧力容器を水平方向に4等分、断面方向に14個のパーツに分け、計64のパーツを用いてモデル構築を行った。各パーツの中心点が熱のやりとりをするとして各点間および外部との熱のやりとりとして、熱伝導、ふく射を考慮し、計算した。圧力容器内部の熱入力としては各 CPU やモーターによる発熱があり、リング3箇所にも $51\text{W}$ 、 $28.4\text{W}$ 、 $13\text{W}$ の熱入力がある。

昼間の熱流入は太陽光が支配的である。断熱処置をしない場合では昼間のリング部温度が $50^{\circ}\text{C}$ を超えてしまい、接触部のシェルの性能が保証できない。複数の対策を検討した結果、リング部は発泡ポリスチレンで覆い、メインリングの羽根部分は白塗装をし、トラスはアルミ蒸

着テープで覆い、ゴンドラの熱を効率よく宇宙空間へ逃がすデザインを採用した。シェルの外側にはポリエチレンの支柱を介して日よけ用のシェルを設け、外部からの熱の流入が内部に伝わりにくいようにした。昼間のシェルの日よけ効果は外的要因に依らず約 10°Cで、夜間の断熱効果は 30°Cであった。トラスによる放熱効果はゴンドラの回転がないとした場合約 50°Cが見込めた。これらの対策によって昼間夜間ともに保証温度を満たすことが可能なデザインとなった。以下に断熱実装を行った最終形態のゴンドラを示す。

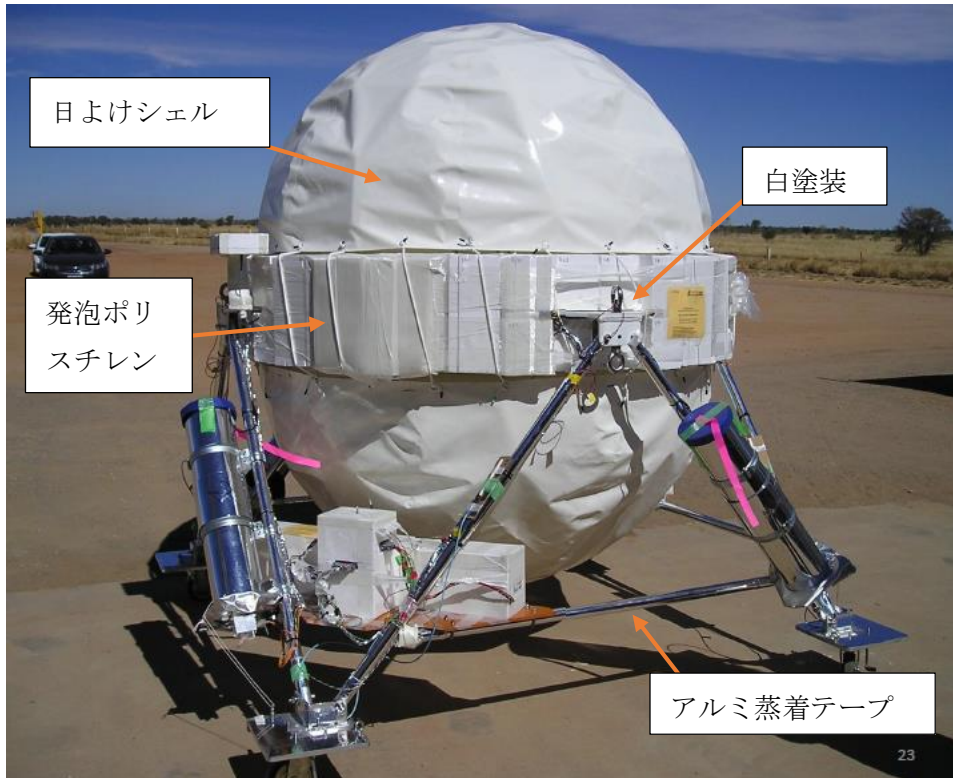


図 5. 断熱実装後のゴンドラ

#### 4. 観測結果

まず、圧力について、図 6 に示すようにフライト全期間にわたって目標としていた 100hPa 以上を保つことに成功した。フライト時の圧力変化は内部の温度変化によるものが支配的で、圧力容器の欠損や性能落ちによる圧力漏れは見られなかった。

次に観測で得られた温度データを示す。観測全期間にわたって圧力容器本体のリングおよびシェルを性能保証温度

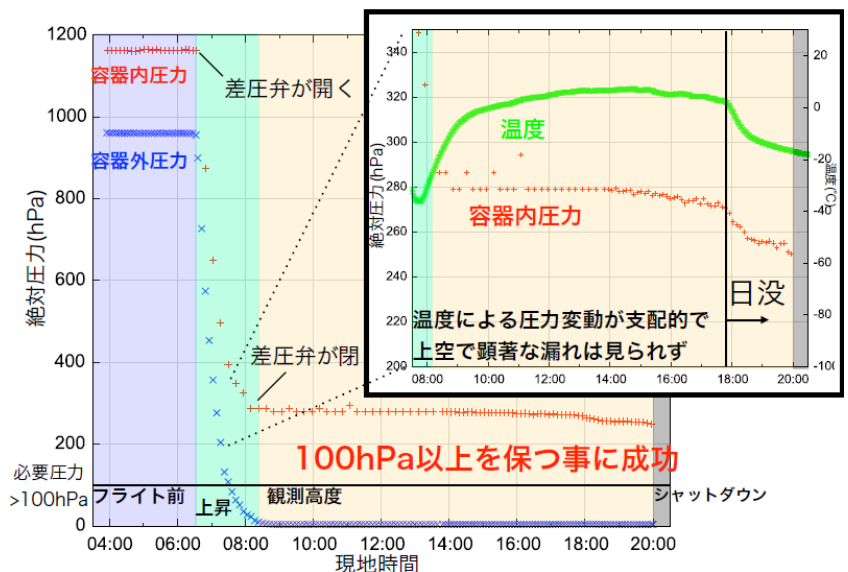


図 6. フライト時の圧力測定結果

範囲の 20°C~40°C に収められた (図 7)。熱項目の少ない打ち上げ直前 (5/12 5:00 まで) や夜間 (5/12 18:30~20:00) においては温度降下具合も計算結果に沿う形となった。シェルの断熱効果については、外シェルの温度と比較して、昼間で約 10°C、夜間で約 30°C の断熱予測が実現できた。今後はさらに解析を進め、昼間の回転の挙動との照らし合わせを行う。

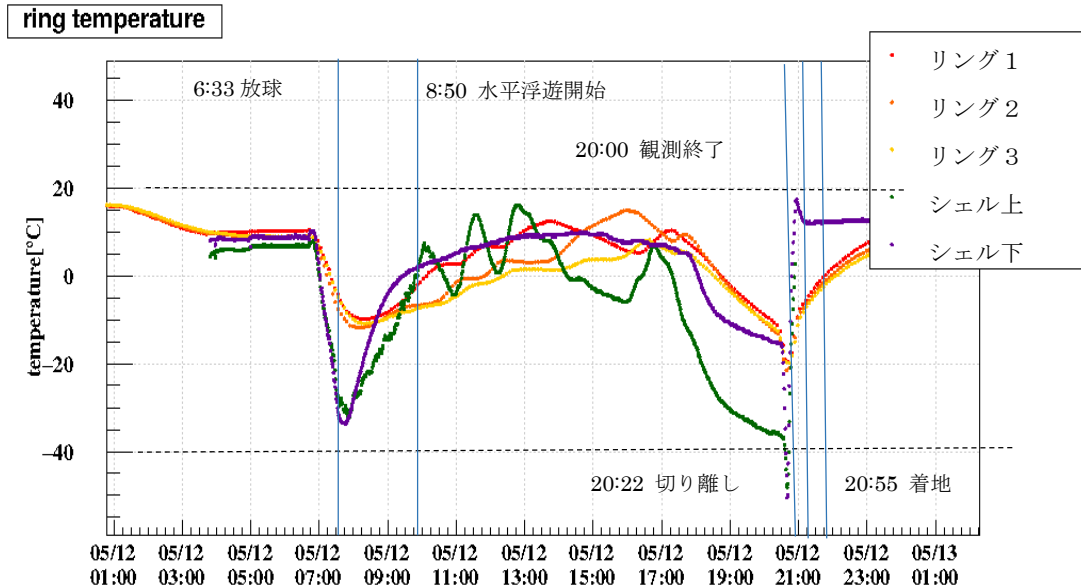


図 7. フライト時の温度測定結果

## 5. まとめ

GRAINE2015 のための圧力容器デザインおよび熱設計を行った。圧力容器は塩ビコーティングポリエステル繊維のシェルを開発し、パッキンとしてシリコンチューブを 2 周させることで、24 時間以上にわたって 100hPa 以上の圧力保持を可能にした。熱設計では、圧力容器を、フライト全期間において性能保証温度 -40°C~20°C 以内に収めることを目標とした。シェルに日よけを設け、トラスにアルミ蒸着テープを巻くことで遮光・放熱促進方策を取り、シェルでは約 10°C、トラスでは約 50°C の温度上昇抑制効果を見込むデザインとした。

実際にフライトを行い、圧力および温度データを取得し、現在解析中である。圧力・温度はともにフライト全期間にわたって要求性能を満たしたことを確認した。温度上昇抑制効果も、期待した通りの性能を確認できた。今後は解析ソフトの導入を検討し、デザインの補完を行うほか、次期 10m<sup>2</sup> の望遠鏡のゴンドラの圧力容器の設計・熱設計に活かす。

熱設計をするにあたり、JAXA の岡崎 峻氏に協力を賜りましたので、ここでお礼申し上げます。

青木 茂樹 他 2004-2011,2013 年度大気球シンポジウム報告,  
 高橋 覚 他 2007-2009,2014,2015 年度大気球シンポジウム報告,  
 六條 宏紀 他 2013,2014 年度大気球シンポジウム報告,  
 大塚直登 他 2015 年度日本物理学会秋季大会,  
 他 GRAINE に関連する大気球シンポジウム報告および学会発表等。