

## 天体観測用気球実験に向けた構造系と指向系の開発 I

粟木久光 (愛媛大学), 斉藤芳隆 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所),  
 松本浩典 (大阪大学), 石村康生 (早稲田大学), 宮下朋之 (早稲田大学),  
 高橋弘充 (広島大学), 古澤彰浩 (藤田医科大学), 田中宏明 (防衛大学校)

### Development of pointing system for balloon-borne astronomical payloads I

AWAKI Hisamitsu (Ehime University), SAITO Yoshitaka (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency), MATSUMOTO Hironori (Osaka University), ISHIMURA Kousei (Waseda University), MIYASHITA Tomoyuki (Waseda University), TAKAHASHI Hiromitsu (Hiroshima University), FURUZAWA Akihiro (Fujita Health University), TANAKA Hiroaki (National Defense Academy)

#### 1. 研究の背景

硬 X 線帯域での 30 秒角以下の撮像観測は未だ行われておらず、多くの科学的成果が予想されている。我々は高角度分解能硬 X 線撮像観測を目指して CFRP を用いた望遠鏡の開発を行っており、硬 X 線帯観測の有効性と技術成熟度の検証を目的とし、将来の気球実験を目指している。高角度分解能望遠鏡の性能を発揮するには、望遠鏡を天体に向け、かつ、その方向を安定させる高い指向性能が求められる。国内では約 15 年前に硬 X 線望遠鏡を搭載した SUMIT 気球実験が実施された。SUMIT は硬 X 線望遠鏡による観測であったが、その指向精度は 1 分角を超えるものであり、また、当時の開発グループは解散し詳細な情報がほとんど残っていない。硬 X 線望遠鏡の焦点距離 8m 以上を確保する大型光学ベンチを精度良く指向させる技術は国内にはなく、米国の WASP (The Wallops Arc Second Pointer) 等の国外に頼らざるを得ないのが現状である。そこで、気球を用いた天体観測を日本主導で実施できるように、大型光学ベンチの製作・制御技術に必要な要素技術を開発し、その技術を気球実験を行って実証する。獲得した技術を気球実験グループ内で共有できるようにまとめ、将来は米国の WASP のような指向装置の共通プラットフォームに発展させたい。

#### 2. 気球実験の概要

大型光学ベンチを搭載する大型気球実験は、海外の実験サイトを利用するためフライト機会が限られること、そして、開発期間やコストが多くかかることが予想される。そこで今回は、北海道大樹航空宇宙実験場において実験可能な小型気球(B-15, B-50 クラス)を利用する。小さめの気球を用いて、風速の弱い高度 28 km 程度を水平浮遊させることにより、飛翔機会を最大化する。我々は、気球で実験可能な 2 m の光学ベンチを気球に搭載し、数秒角以内の精度で指向制御するシステムを 2027 年度のフライトを目指して開発する。この実験の成果を受けて、次のステップとして 8 m の大型光学ベンチにトライする。

	FY2023		FY2024				FY2025				FY2026				FY2027				FY2028
	4-8	10-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-3
イベント (大気球シンガ等)		★																	★
気球スケジュール	準備・検討		設計・製造 (2年間) 試験を適宜入れる								予備・試験		試験 (確み合わせ)		準備	フライト	回収・姿勢データ等の評価		
構造系 (光学ベンチ・変位系)	準備		設計				製造・試験				系横断の試験								
姿勢系 (制御系+決定系)	準備		設計				製造・試験				系横断の試験								
サイエンス系 (反射鏡+検出器)	準備		設計				製造・試験				系横断の試験								
その他 (電源+通信等)	準備		設計				製造・試験				系横断の試験								

図 1 本研究の開発スケジュール概要

### 3. 研究・開発の内容

指向性は姿勢制御と光学ベンチの変位の両方に影響されるため、本研究の開発項目として、「姿勢安定性の要素開発」、「光学ベンチの製作並びに変位測定技術の開発」を行う。また、CFRP 反射鏡のフライト環境下での性能変化を評価するために光学ベンチに CFRP 望遠鏡を搭載するが、気球高度と焦点距離の制約から宇宙 X 線の検出が困難であるため、可視光で天体を観測し結像性能を評価する。以下、項目毎に説明する。

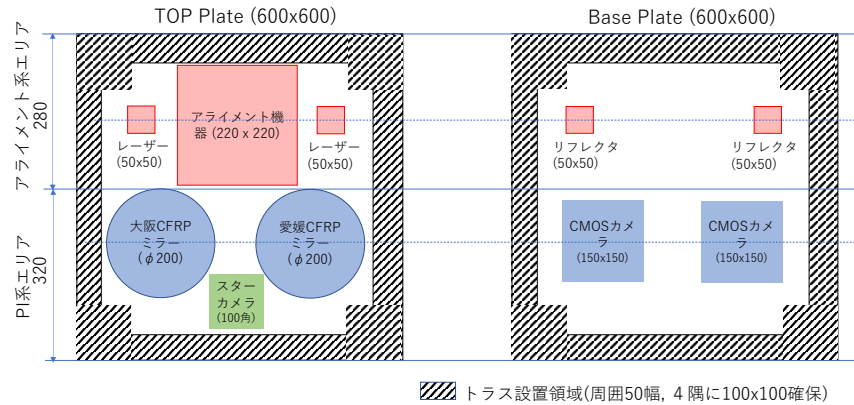


図 2 TOP/Base Plate 上での機器配置図

#### (1) 姿勢安定性の要素開発 (姿勢制御精度：10 秒角以内)

姿勢制御系は、SUMIT で採用された経緯台方式（方位角と仰角を制御）を継承し発展させる。ただし、スターカメラはリソース節約のため視野方向のみ 1 台とする(図 2 参照)。SUMIT のフライト実験ではゴンドラの揺れ（振り子運動）により指向精度は 3.56 分角であった（2007 年日本天文学会春季年会上野、古澤他）。この揺れを軽減するために、姿勢駆動系として WASP で採用されている Azimuth と Elevation 方向の 2 軸のジンバル構造を導入する(図 3 参照)。ジンバルを構成する Frame は Hub で接続されている。ジンバルの金属加工は愛媛大学金属実習工場にて行う予定であり、組上げ・試験も入れて開発期間として約 1 年間を見込んでいる。現在、設計を fix するためのエンジニアリングモデル(EM)を製作中である。

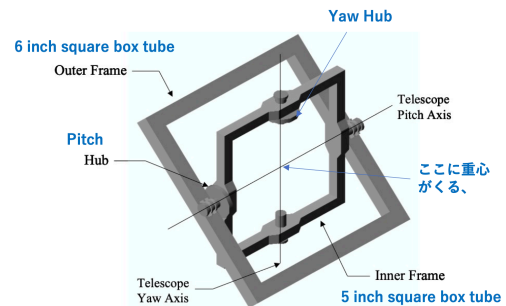


図 3 WASP ジンバル構造

また、SUMIT では導入されていなかったフィードフォワード制御を制御ロジックに組み込む予定である。

#### (2) 光学ベンチの製作と変位測定技術の開発

変位計測技術は、大型化する機器で生じる歪みの測定で有効であり、気球実験のような重力の影響を受ける構造体では特に有効な技術となる。歪みの測定は、指向性異常の検出と原因究明に役立つとともに観測データの補正を行うことを可能とする。さらに、歪みを補正する機構を構造体に組み込むことも可能とする。これにより、精密な構造体を必要とする干渉計などの実験への応用が期待される。

大型光学ベンチの変位には、図 4 に示すように並進変位と回転変位の 2 種類があり、ウォルター光学系の場合、並進変位では焦点位置での像のずれが発生し、回転変位では天体の焦点面での位置は変わらないが望遠鏡の vignetting の影響で強度が変化する。このため取得したデータの質の保証や指向性の影響の補償には、姿勢情報以外に高精度変位計測装置が必要となる。測定装置の概念図を図 4 に示す。レトロリフレクタを用いることでレトロリフレクタの回転の影響を受けず、構造物の変形による並進変位が 2 倍となって PSD 上のレーザーの変位として検出でき、フラットミラーを用いることで、並進の影響を受けず、回転変位が PSD(受光ユニット)上のレーザーの変位として検出できる。現在、10 m 規模の構造物の

50  $\mu\text{m}$  オーダー(1 秒角相当)の精度で計測できる変位計測装置を研究開発中であり、DREAM 気球実験を通して気球実験環境下における 1m 規模での機能実証やスケールファクタの評価はできている。

本研究では、焦点距離 2m 用の光学ベンチに図 4 の計測装置を組み込み、2m の光学ベンチで成立するのかを検証するとともに、気球実験環境下でのバイアス変動の評価を含めた検証も実施する。

光学ベンチの開発では、多くの気球実験で利用できるように、安価に製造・組立可能な中精度の組立構造を持つものをコンセプトとする。この場合、剛性、精度、組み立て/分解の容易さをポイントに各構造部材間の締結部の設計を行う。

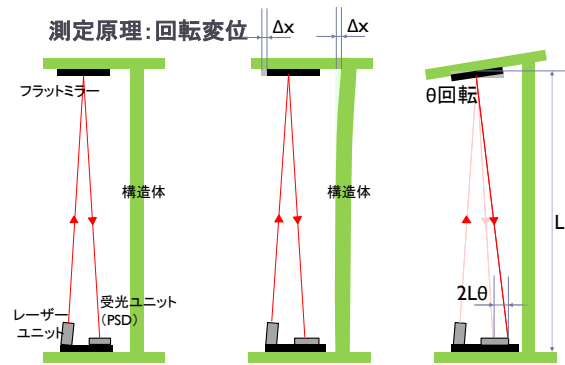


図 4 変位計測概念図 (石村他 2022)

### (3) CFRP 反射鏡の気球環境下での性能評価

CFRP 反射鏡を宇宙で利用するには、地上と上空で性能が変化しないこと、長期安定性を保証する必要がある。本開発では焦点距離 2m のウォルター型 CFRP 反射鏡を搭載した望遠鏡を製作し、可視光望遠鏡として使用する。上空で取得した星の画像から結像性能の変化や安定性に関するデータを収集し、宇宙利用の可能性を評価する。CFRP 反射鏡は、愛媛大学と大阪大学を中心としても行われている(図 5 愛媛での CFRP 望遠鏡例(2 段 1 周))。大阪大学では NiP を CFRP 基板表面に貼り付けたのちに NiP 表面を超精密加工機で加工する方法(目標 10 秒角以下)をとっている。愛媛大学、大阪大学それぞれ 1 台ずつ口径 100 mm 以下の CFRP 望遠鏡を製作し、搭載する。焦点面検出器としては可視光 CMOS センサを配置する。

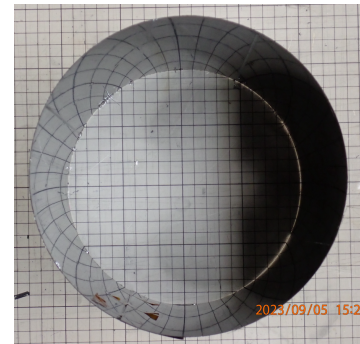


図 5 CFRP 望遠鏡基板(φ200)

## 4. まとめと課題

我々は硬 X 線天体の撮像観測を目指して高角度分解能硬 X 線望遠鏡の開発を行なっている。我々は、気球実験を通して硬 X 線望遠鏡の可能性を検証したいと考えており、そのために必要な気球実験用指向制御系の開発を行う。指向制御系の開発では、実験機会を最大化するために、国内のサイトで実験可能な規模(焦点距離 2m)での開発を進める。この実験経験を踏まえて、焦点距離 8m の大型光学ベンチ搭載気球用の指向制御系やさらには米国 WASP のような指向装置の共通プラットフォームへと発展させたい。

## 謝辞

本研究開発を進めるにあたり、さまざまな気球実験グループの方から情報をいただきました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

“The NASA Wallps Arc-Second Pointer (WASP0 System for Precision Pointing of Scientific Balloon Instruments and Telescopes”, Stuchli, D.W, and Lanzi, R.J., AIAA Balloon Systems Conference, 2017, 10.2514/6.2017-3609

「高精度変位計測装置の大気球環境での機能実証(2021 年度飛翔実験)」石村康生他 2022, 大気球研究報告、 pp35-49, JAXA-RR-21-003