

天体観測用気球実験に向けた構造系と指向系の開発 II

粟木久光、田淵優、芳川隆幸（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、宮下朋之、定村 嵐、須賀広幸（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 II

AWAKI Hisamitsu, TABUCHI Yu, YOSHIKAWA Takayuki (Ehime University), SAITO Yoshitaka (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency), MATSUMOTO Hironori (Osaka University), ISHIMURA Kosei, MIYASHITA Tomoyuki, JOMURA Ran, SUGA Hiroyuki (Waseda University), TAKAHASHI Hiromitsu (Hiroshima University), FURUZAWA Akihiro (Fujita Health University), TANAKA Hiroaki (National Defense Academy)

1. 研究の背景

硬 X 線帯域での高角度分解能撮像観測には多くの科学的成果が予想されており、その観測が期待されている。我々は CFRP を用いた角度分解能 30 秒角以下の硬 X 線望遠鏡の開発を進めており、将来、気球実験を通して硬 X 線帯観測の有効性と技術成熟度の検証を行いたいと考えている。天体観測では、望遠鏡を天体に向け、その方向を安定させる高い指向性能が求められる。しかし、国内気球実験には焦点距離 8m 以上の硬 X 線光学系を指向精度 1 分角以下で制御する技術はなく、米国の WASP (The Wallops Arc Second Pointer)¹⁾等の技術に頼らざるを得ない。

本研究では、大型光学ベンチも搭載可能な気球実験用指向系の要素技術を開発する。ただし、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とともに、開発期間やコストが多くかかる。そこで、飛翔機会を最大化させるために、北海道大樹航空宇宙実験場において実験可能な B-50 クラスの気球に搭載可能な 2m の光学ベンチを製作し、これを指向精度 数秒角以内で制御することを目標に開発する。そして、地上開発ならびにフライト実験で得たデータを元に 8 m の大型光学ベンチに発展するための技術と知見を得る。本講演では、計画中の気球実験の概要を説明するとともに、機器開発の現状について紹介する。なお、本研究開発で得た成果は資料として残し、国内気球実験グループの共有財産としたい。図 1 は 2027 年度のフライトを目指した場合のスケジュール概要である。

	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	4-3
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 (1年間)				試験を適宜入れる	予備	試験 (噛み合わせ)		準備	フライト	姿勢データ等の評価、資料作成		
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

2. 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、本研究の開発項目を「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」とした。また、気球環境下での CFRP 反射鏡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。気球高度と焦点距離の制約から宇宙 X 線の検出は困難であるが、可視光で星を観測することで結像性能の評価は可能である。現在、反射鏡の開発ならびにデザイン検討等を行なっている。以下、指向制御の開発に関し、項目毎に説明する。なお、光学ベンチのトッププレートとベースプレートに配置する機器は図 2 の通りである。

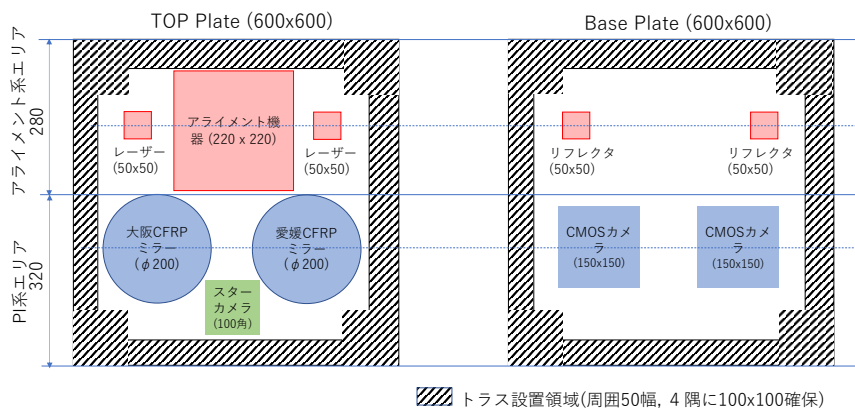


図 2 TOP/Base Plate 上での機器配置図

(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、PIVOT²⁾による方位角方向の粗制御と 2 軸ジンバルによる方位角と仰角の精密制御で構成される。2 軸ジンバルを搭載することで、SUMIT のフライト実験でみられたゴンドラの揺れ (振り子運動) (指向精度 3.56 分角:2007 年日本天文学会春季年会上野、古澤他) を抑制する。姿勢決定は、粗姿勢では GPS コンパス(精度 1° 程度)を用いて、精密姿勢では視野方向に取り付けたスターカメラ(図 2 参照)を用いて行う。

図 3 は現在検討中のジンバルの概念図である。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参考にデザインした。Azimuth, Elevation のそれぞれの枠は駆動用モータを搭載した Motor Hub、エンコーダを搭載した Resolver Hub の 2 種類の Hub で支持される。駆動用モータとして、8m の大型光学ベンチにも対応できるように、SUMIT の PIVOT で使用したモータと同程度のトルクを持つものを使用し、回転角を計測するエンコーダにはサブ秒角の分解能を持つものを使用する。

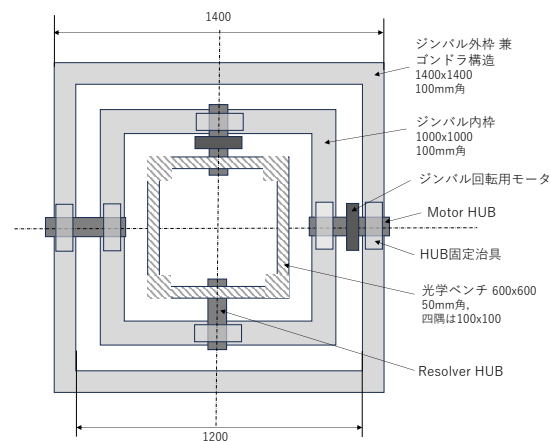


図 3 ジンバル構造概念図

現在、フライト用ジンバルの詳細設計を行うために、1 軸のテスト用ジンバルを組み上げ、試験を行っている。図 4 に製作した Resolver Hub と Motor Hub を示す。Resolver Hub にはエンコーダ搭載用スペースを設けているが、未搭載である。Motor Hub にはテスト用に、Kollmorgen 社のフレームレスモータ TBM2G-11513A-AHAA-00 を使用し、モータドライバとして ELMO 社の G-SOLTWI10/100ME7S を使用した。エンコーダは暫定的に Netzer 社の VLX-60-IG-CH(分解能 5 秒角)を Motor Hub に取り付けた。ドライバと計算機(PC)は USB を介して接続されている。

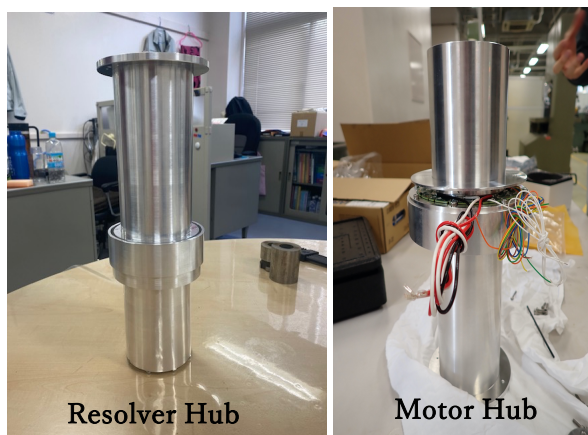


図 4 テスト用 Hub

Motor Hub 単体での動作試験の 1 つとして、Motor Hub のモータに流れる電流とトルクの関係性を調査した。図 5 は Motor Hub にトルク N をかけた状態で低速度での回転指令を送信した時に、モータに流れた電流 I を示したものである。このグラフから N が I と比例していること ($N \propto 0.5 \cdot I$) が分かる。Motor HUB に $2.96[N \cdot m]$ のトルクをかけたところ、モータが回転しな

なくなったことから、モータの最大トルクは $2.96 \text{ [N} \cdot \text{m]}$ と推察される。この値は定格トルク $T_c (=3.04 \text{ [N} \cdot \text{m]})$ とほぼ同じ値である。

図 6 は 2 種類の Hub をテスト用の 1 軸ジンバルに取り付けたものである(2024 年日本天文学会秋季年会 田淵他)。外枠は断面 100×100 のアルミフレームで構成され、アルミフレームの 4 隅はハードブラケットならびに厚さ 2 mm のアルミ板で固定されている。Hub を介して 2 枚のアルミ板($500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$)が取り付けられており(図 6 参照)、2 枚のアルミ板の慣性モーメントは 0.15 kg m^2 (計算値)、板の回転に必要な最低トルク N_0 は 0.049 Nm (実測値)である。現在、このテスト用ジンバルを用いて、モータ制御の実験を進めている。図 7 は約 30 秒角(エンコーダ出力 7counts)ごとに回転させたときの位置の測定値である。このジンバル用の PID 制御パラメータのチューニングが未完のため、目標値に達するまでにおよそ 1 秒かかっている。必要に応じてさらなるチューニングを行う。今後は、アルミ板中央に模擬スターカメラを設置し、平行光源を観測することで、姿勢安定度の調査を行うとともに、姿勢制御用 PC (Raspberry PI)からの制御を試みる予定である。

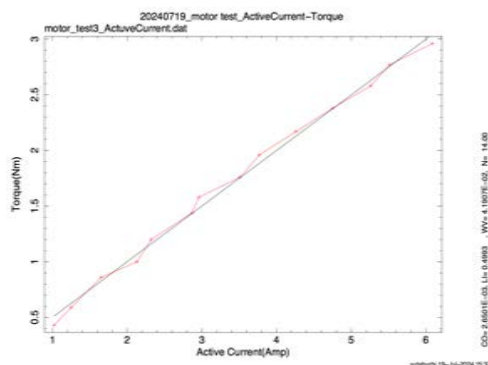


図 5 Motor Hub にかけたトルクと電流値

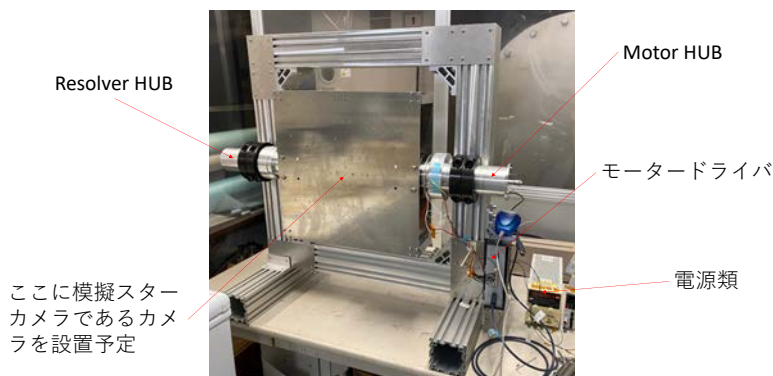


図 6 テスト用 1 軸ジンバルの外観

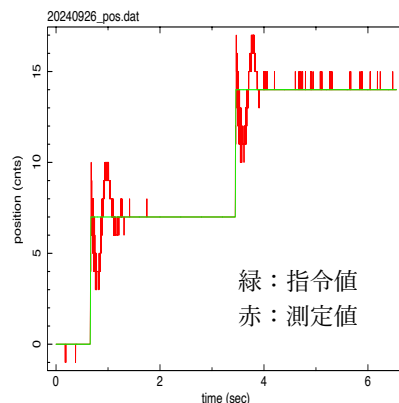


図 7 テスト用 1 軸ジンバルを 30 秒角ごとに回転させたときの回転角の変化

(2) 光学ベンチの製作と変位測定技術の開発

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 8 は、光学架台に加わる荷重を条件として、静剛性(コンプライアンス)を評価対象に位相最適化を実施し、部材配置を一次的に検討したものである。

変位計測技術は、大型建造物のゆがみの測定をするためのものである。気球実験では、重力環境下での姿勢変化によって、構造への荷重条件が変化したり、大きな温度変化による熱変形が発生したりするために、このゆがみの計測評価は重要な技術である。光学架台のゆがみの測定は、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、将来的にはゆがみを補正する機構を構造体に組み込む場合の利用も想定される。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。

大型光学ベンチの光軸に対する検出器の変位には、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

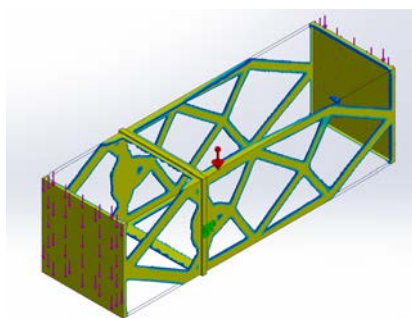


図 8 位相最適化された光学架台

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。

図 9 に、ここで検討している変位計測装置の原理を示す。レーザは望遠鏡側から射出し、レトロリフレクタを検出器側に取り付け。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)上のレーザの変位として検出できる。現在、10 m 規模の構造物を 50 μm 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 1 m 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³⁾。本研究では、焦点距離 2 m 用の光学ベンチに図 9 の計測装置を組み込み、2 m 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。

現在、これらの機器を搭載した気球実験システムをゴンドラ等 (図 10) を含めて設計中であり、来年より、実際の製造に移行する。

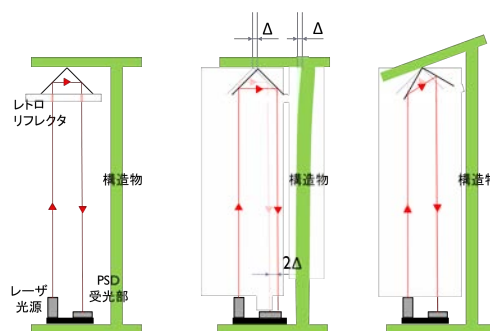


図 9 変位計測概念図

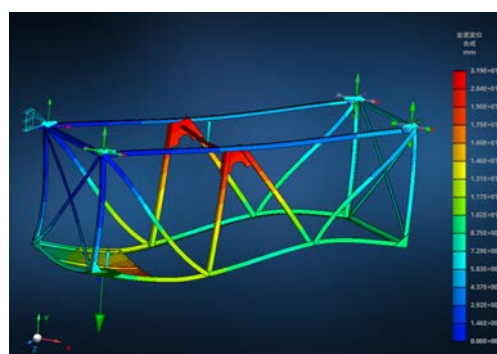


図 10 パラシュート開傘時のゴンドラ構造の変形の様子

3. まとめと課題

我々は硬 X 線天体の撮像観測に必要な気球搭載用高精度指向制御系の開発を行なっている。8 m 超の焦点距離に対応した大型光学ベンチでは、現有技術からの飛躍が大きいこと、ならびに国内のサイトではフライト実験ができないことから、国内のサイトで実験可能な規模 (焦点距離 2 m) での開発を進める。この実験経験を通して、焦点距離 8 m 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る。

現在、我々は来年度からの製作に向けて、テストモデルによる基礎データの収集ならびにモデルを用いたゴンドラ構造の変形の様子を調査しており、2027 年度のフライトを目指し開発を進めている。来年度後半から、組み立てや単体での試験を実施する予定であり、スペース確保や環境試験装置の手配などを行う必要がある。

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。特に、宇宙科学研究所土居さんには多くのご助言をいただきました。ここに感謝いたします。本研究は、科学研究費基盤研究 A (代表：松本浩典) の助成によって行われています。

参考文献

- 1) “The NASA Wallops 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
- 2) 「気球実験のための姿勢制御システムの開発」土居明広他 2021, 大気球研究報告、 pp57-67, DOI: 10.20637/00047385
- 3) 「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