

成層圏望遠鏡(FUJIN-2)による金星紫外吸収物質の同定

田口 真・江口倫太郎(立教大学理学部)

河野大輔(立教大学大学院理学研究科)

荘司泰弘・西出太郎・川筋直樹・近藤大宙(金沢大学理工研究域)

中野壽彦(大分工業高等専門学校機械工学科)

高橋幸弘・佐藤光輝・高木聖子・濱本 昂・大野辰遼(北海道大学大学院理学研究院)

今井正堯(東京大学大学院理学系研究科)

FUJIN-2 実験の目的、科学的意義、観測方法については過年度の集録原稿[Taguchi et al., 2020; 2021]に詳しく述べてある。本稿では集録原稿[Taguchi et al., 2022]に記述された科学目的を再掲し、その後この1年間の開発状況を報告する。

金星大気のスーパーローテーションの発生メカニズムは長年にわたる謎の1つであった。金星探査機「あかつき」の観測結果と全球モデルによるシミュレーションによる研究によって、高度 60~70 km の雲層中での太陽放射加熱によって発生する熱潮汐波がスーパーローテーションの維持に必要な角運動量輸送を担っていることが明らかになった[Horinouchi et al., 2020; Takagi et al., 2018; Yamamoto et al., 2019]。雲層中に存在する可視・紫外光吸収物質の分布が太陽放射加熱率分布を決めている。320 nm より短波長側の吸収は SO₂ によると判明しているが、320 nm より長波長側の吸収の原因物質は未同定である。候補物質として硫黄を含んだ物質など (S₃, S₄, S₈, S₂O, FeCl₃ など) が提唱されてきた[e.g., Esposito et al., 1997]。Perez-Hoyos et al. [2018]は、水星探査機 Messenger 搭載分光器による観測から波長 300~500 nm における吸収帯を再現するには波長 365 nm 付近に強い吸収をもつ S₂O か OSSO が最も有力な候補であることを示した。しかし、過去の探査機や地上望遠鏡による観測の波長分解能 (4 nm 程度) では吸収帯の特徴を捉えられず、吸収物質を特定できていない。

我々は吸収物質の有力候補である S₂O と OSSO の吸収スペクトル形状の違いに着眼し、両者の分光観測を提案している。OSSO は波長 290~400 nm の領域で cis-型と trans-型で中心波長の異なる広がった吸収が重なった二山の吸収構造を示す。一方、S₂O には 339, 346, 353, 360, 368 nm に最大で 8%の深さをもつ鋭い吸収線が存在する。このため、金星の波長 290~500 nm の領域を従来よりも一桁高い 0.4 nm 程度の波長分解能で観測できれば、S₂O と OSSO が示す特徴的な吸収線を定量的に評価し、それらの存在量を推定することが可能である。それらの存在量を S, SO, SO₂ などの既知の物質の分布と合わせて化学平衡状態を計算し、硫黄化合物全体の存在量を計算できる。

地上望遠鏡では地球大気の成層圏中に存在するオゾンによる吸収のため 330 nm よりも短い波長帯の観測は困難で、両者の定量的な同定はできない。また、探査機による観測を実現するには、長い時間と大きなコストが要求される。そこで、金星大気の未知の吸収物質を同定する手段として気球によって成層圏にまで上昇させた光学望遠鏡 (風神、FUJIN-2) による観測を提案している。本研究では FUJIN-2 を用いた金星の分光及び撮像観測によって、吸収物質の同定と太陽放射加熱率分布の解明を目的とする。

2022 年度は 2023 年 4 月頃の豪州実験を目指して FUJIN-2 ゴンドラを開発した (図 1)。望遠鏡を搭載したゴンドラは気球によって高度約 32 km に浮遊しながら姿勢センサー及び 4 台のコントロ

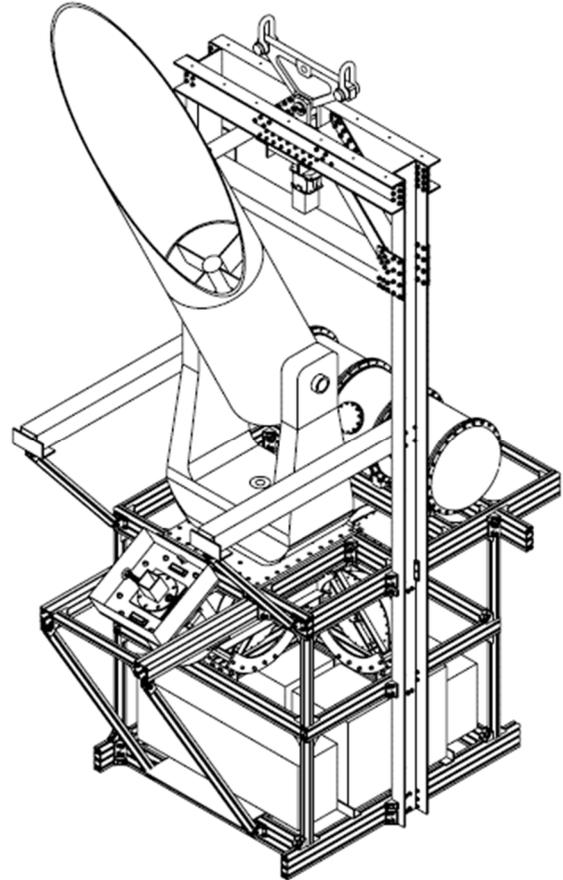


図1. (左)仮組立中の FUJIN-2 ギンドラ(2022年8月)。(右)FUJIN-2 ギンドラの CAD 図面。CAD 図面には望遠鏡の脇にピギーバックの miniSGD が描かれている。写真ではその位置にダミーウェイトが置かれている。ギンドラの吊り点までの高さは 3874 mm、総重量はバラスト 575 kg 及び miniSGD 込みで 1400 kg である。

ールモーメントジャイロ(CMG)により絶対空間に対して姿勢を安定化する。望遠鏡の架台を動かして目標天体を望遠鏡視野に導入する。目標天体追尾のエラーは鏡筒内に設置した第3鏡の傾きをリアルタイムに制御して補正する。

大気球実験グループに過去の放球時の映像解析から3軸方向にかかる力を見積もった結果を用いて、以下のように機械環境条件を再設定した。

1. 定義

ϕ は放球時の吊り紐の傾き角である。 $\phi = 0$ は無風で気球が鉛直上方(y方向)にまっすぐ立ち上がっている状態で、 $\phi = 30^\circ$ は水平風によって気球が風下に流されている状態で安全に放球できる限界である。 θ は水平面内で放球クレーンの向き(x方向)と風向のなす角である。放球時に吊り紐からギンドラの吊り点にかかる力の水平成分の最大値を F_h とする。

$$F_h = 25500 \text{ N} \quad (\phi = 30^\circ, \text{荷重倍数}=1.5, \text{ノンテストファクタ}=1.5)$$

$$F_x = F_h \cos \theta$$

$$F_z = F_h \sin \theta$$

2. 放球時にギンドラ吊り点にかかる力によって機能が喪失または低下しないこと

- ① x方向力最大ケース($\theta = 0^\circ$)

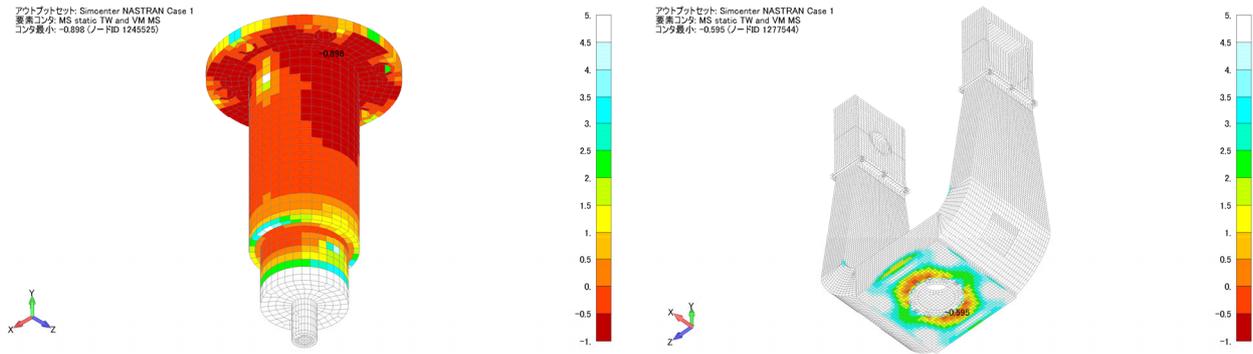


図2. (左)DCP 回転軸図、(右)経緯台フォークの MS 分布。赤は MS が負を示す。

$$F_x = \pm 25500 \text{ N}$$

$$F_y = 29400 \text{ N}$$

$$F_z = 0 \text{ N}$$

② z方向力最大ケース($\theta = 30^\circ$)

$$F_x = \pm 22100 \text{ N}$$

$$F_y = 29400 \text{ N}$$

$$F_z = \pm 12800 \text{ N}$$

3. 落下傘開傘時に Gondola 吊り点にかかる力によって破壊しないこと

$$F_y = ma_y$$

$$a_y = 15 \text{ G}$$

m は Gondola 質量(バラスト質量を除く)

以上の条件で図1に示す FUJIN-2 Gondola 構造モデルで改めて解析を行ったところ、Gondola は放球時にかかる外力に耐えられないことが判明した。図2に示すように、強度が不足する部分は主に Gondola と気球を結合する回転軸部分(DCP)と望遠鏡架台の方位角軸部分である。2023年4月の豪州実験のキャンセルにより、ピギーバックの miniSGD が載らないことになった。また、経緯台の方位角軸はなくして Gondola にフォークを直接取り付けることにした。それによって望遠鏡取付面から経緯台高度軸までの高さが低くできるため、Gondola 全体の高さも低くなる。それは Gondola を支える2本の柱の強度にとっても好都合である。そのような方向で設計変更した Gondola の解析を現在(2023年10月時点)進めている。

FUJIN-2 はリチウムイオン二次電池を電源としている。これまでの電源の電流容量は公称 100 Ah であるが、実効は 78 Ah しかないことがわかった。容量を増やすために電源系の改修を行っている。新しい電源は 100 Ah の電池を2パック搭載する。電池容積はこれまでの電池よりも小さくなる。過放電防止装置も取り付ける予定である。将来的に太陽電池パネルを搭載する場合の充電入力も備える。

2023年4月から金沢大学を FUJIN-2 開発の本拠地として活動している。金沢大学の実験室では Gondola の姿勢制御の開発(金沢大学担当)とガイドエラー補正機構の開発(立教大学担当)を平行して進めている。また、大分高専及び東京大学で搭載 OBC ソフトウェアと地上系ソフトウェアの開発を行っている。2023年11月に Gondola の姿勢制御とガイドエラー補正機構の統合試験を予定している。画素数が多く感度が高い新しい CMOS カメラを導入し、性能評価試験を行っている。分光器とカメラの試験を兼ねた金星の地上観測を2023年8月にハワイ・マウイ島のハレアカラ山

観測所において実施する予定であったが、マウイ島での大規模火災のために中止された。その代わりに、10月下旬～11月上旬に東京大学木曾天文台において金星観測を実施する。その際にはFUJIN-2に搭載される分光器とカメラを300 mmカセグレン望遠鏡に取り付けて金星を観測する。

大気球実験グループのご協力の下、簡易的なEMC試験を実施した。電子機器や電源を収納する気密容器から外部機器への電源線や信号線が出入りするコネクタ付フランジ付近で電波強度を測定した。主電源オン（OBC 2台、ラズベリーパイ 2台、SWHUB 2台などがオン）の段階で許容値-104 dBmに対して25 dB程度オーバーしていて、CMGを稼働させるとさらに5 dB程度上昇することがわかった。今後、EMC対策を講じる。

図3に2025年から2027年の3～5月の金星視直径と太陽離角を示す。2025年は3月23日に金星が内合となり、4月中旬以降が観測好機となる。2026年と2027年は何れも金星視直径が小さく観測には適さない。FUJIN-2は2025年の豪州実験を希望する。

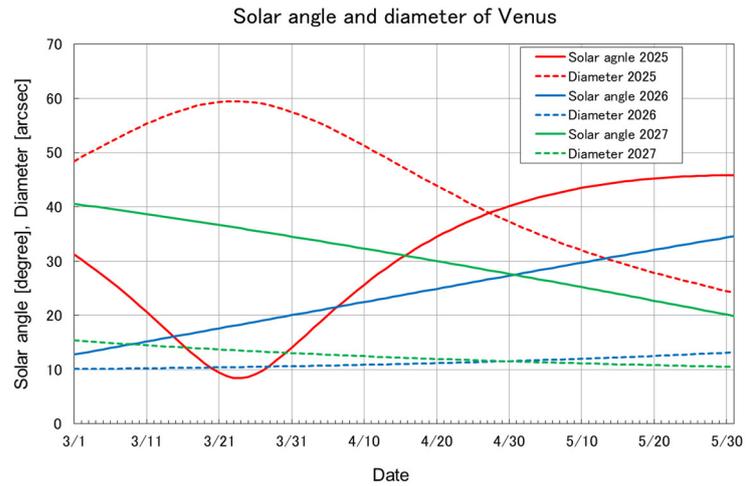


図3. 金星視直径と太陽離角(2025～2027年3～5月)。