

極周回成層圏テレスコープ(FUJIN)による惑星大気観測計画

田口 真・前田惇徳(立教大学理学部)

吉田和哉・坂本祐二(東北大学大学院工学研究科)

中野壽彦(大分工業高等専門学校機械工学科)

荘司泰弘(大阪大学大学院工学研究科)

高橋幸弘・渡辺 誠・今井正堯・合田雄哉(北海道大学大学院理学研究院)

1. 目的

我々は望遠鏡による光学観測を通じて惑星大気・プラズマ中で起こる現象を研究している。しかし、国内外の大型望遠鏡はマシンタイムが限られる上に、シーイングや天候条件のため十分な観測ができない状況である。そこで、高度 30 km 以上の成層圏では大気が安定している上に大気密度が地上の 1/100 以下になるため、地上と比較してシーイングが格段に向上することと大気の透過率が高くなることに着目した。小口径の望遠鏡でも回折限界の角度分解能が達成できれば、地上の大口径望遠鏡に引けをとらない空間分解能で観測が期待される。また、320 nm よりも短波長側はオゾン及び酸素分子による強い吸収を受けるため、地上観測は不可能である。しかし、オゾン層の密度ピークは高度 25 km 付近にあるため、気球によってオゾン層の上空に達すれば波長 300 nm での観測が可能になる。さらに、極域成層圏では天体を 24 時間以上にわたって連続に観測可能なウィンドウが存在する。このようなメリットを生かし、極域成層圏に光学望遠鏡を浮遊させ、惑星表面の連続観測によって惑星大気・プラズマの物理を研究することを目的とするプロジェクト風神(FUJIN)を進めている。

2012年度及び2013年度に大樹町における気球実験でFUJIN-1のフライトを予定していたが、天候不適及び気球バスシステムの不具合のため、FUJIN-1 気球実験は中止された。FUJIN-1 実験と平行して 2011年からは、その先の極域での FUJIN-2 実験で使用する新しい望遠鏡を開発してきた。2013年に、FUJIN-1 実験に伴う各種地上試験によって FUJIN-1 の目的は達成されたと判断し、次のステップである FUJIN-2 実験を本格的にスタートさせた[Shoji et al., 2013]。

FUJIN-2 実験では、スウェーデン・キルナの ESRANGE を放球場所とする。キルナでの気球実験の進め方としては、まず、スカンジナビア半島内でゴンドラを回収できるように上空の風が止まる(ターンアラウンド)時期である4、5月か、8、9月に1~2日のフライトによって、長時間フライトでの性能確認と金星の連続撮像観測を実施する。その次のステップとして、キルナで放球してほぼ等緯度を西向きにフライトし、2~3週間後にキルナ周辺のスカンジナビア半島内でゴンドラを回収する長時間フライト(FUJIN-3)を計画している。極周回フライトのウィンドウはターンアラウンド期のフライトウィンドウの間、すなわち東風が卓越する6月~7月となる。

科学的には、これまで2週間連続して同じ太陽位相角から金星紫外画像データを取得した例はなく、地上には到達しない 320 nm 以下の波長帯での SO₂ 吸収帯及び波長 320~500 nm の未知の吸収物質による吸収波長帯の連続画像から金星上層雲に見られる紫外吸収物質の成因、金星大気中の大規模波動がダイナミクスに与える影響、金星大気のエネルギー収支を明らかにする。また、オプション観測として、水星、火星、木星を連続して撮像することにより、それぞれの惑星の大気やプラズマに特有な変動現象を研究する。

本稿では、FUJIN-2 システムの概要及び今後の実験計画を報告する。

2. FUJIN-2 システム

FUJIN-2の基本的な概念や構造はFUJIN-1(図1)のそれらを踏襲する。ゴンドラの姿勢制御、望遠鏡経緯台による天体捕捉・追尾、二軸可動鏡(TTM)によるリアルタイム追尾エラー補正の三段階ポインティング制御で、目標天体を追尾する(図2)。ただし、北極での長期間観測に合わせて、いくつかの点で改良を施す。

北極での実験に使用する新しいカセグレン式望遠鏡の口径は400 mm、合成Fは30~40の可変である。経緯台はゴンドラから吊り下げる形の逆さフォーク式で、ナスミス焦点2カ所を備える。FUJIN-1と同様に、第三鏡にTTMを用いて経緯台による追尾エラーを補正する。望遠鏡で集光された光の一部は位置検出光電子増倍管(PMT)に導かれる。TTMはPMTで検出された天体像位置の中心からの偏差をフィードバックしてリアルタイムで制御される。TTM及びPMTは高電圧を使用するため1気圧封じの容器に収納される。望遠鏡で集光された大部分の光は撮像用CCDへの光路へ導かれる。途中に挿入したフィルターターレットで10枚のバンドパスフィルターのうち1枚を選択できる。

ゴンドラはアルミ引き抜き材を組み上げた直方体が基本形である。ゴンドラの姿勢はコントロールモーメントジャイロ(CMG)及びゴンドラ吊り紐のよもどし機構(DCP)によって $\sim 0.5^\circ$ の精度で制御される。ゴンドラ方位角はサンセンサー及びGA(地磁気)センサーで知る。FUJIN-1では鉛直軸周りの一軸だけの姿勢制御であったが、FUJIN-2では4台のCMGを備えて三軸姿勢制御となる。

電力は太陽電池パネルから供給され、リチウムイオン電池に蓄えられる。太陽電池パネルの公称最大出力はFUJIN-1の250 Wから、FUJIN-2の540 Wに増強される。ゴンドラは太陽電池パネルが取り付けられた側面を常に太陽方向に向けて姿勢を安定化する。日陰中の動作に必要な電力はリチウムイオン電池から供給する。3.78V 10 Ahのリチウムイオン電池を7個直列に接続し、それをさらに10組並列に接続することで、26.6 V 100 Ahを得ている。リチウムイオン電池及び充電回路は気密容器に納められている。

ゴンドラの姿勢及び望遠鏡の経緯台はオンボードCPUで制御され、望遠鏡視野内($\sim 0.028^\circ$)に目標天体をとらえる。望遠鏡視野に天体をとらえるために2台のスターセンサーを備える。スターセンサーの視野は $5.6^\circ \times 4.2^\circ$ 及び $0.93^\circ \times 0.70^\circ$ である。望遠鏡は高度角 $0 \sim 70^\circ$ の範囲の天体を視野に入れられる。天体の太陽離角(方位角方向)が 15° 以上であれば、太陽光が直接望遠鏡開口部に入射しないように、フードを備える。径に対して長大なフードとなるため、フード本体の素材としてCFRPを使用する。太陽が天体に対してどの方向にあっても太陽光入射を100%遮れるように、フードは望遠鏡光軸周りに回転可能である。

FUJIN-2と地上との通信はESRANGEが提供するMbpsオーダーの高速ダウンリンクが可能なE-LINKを利用する。ただし、極周回フライトの場合にはE-LINKが使えないので、イリジウム衛星回線を用いる。こ

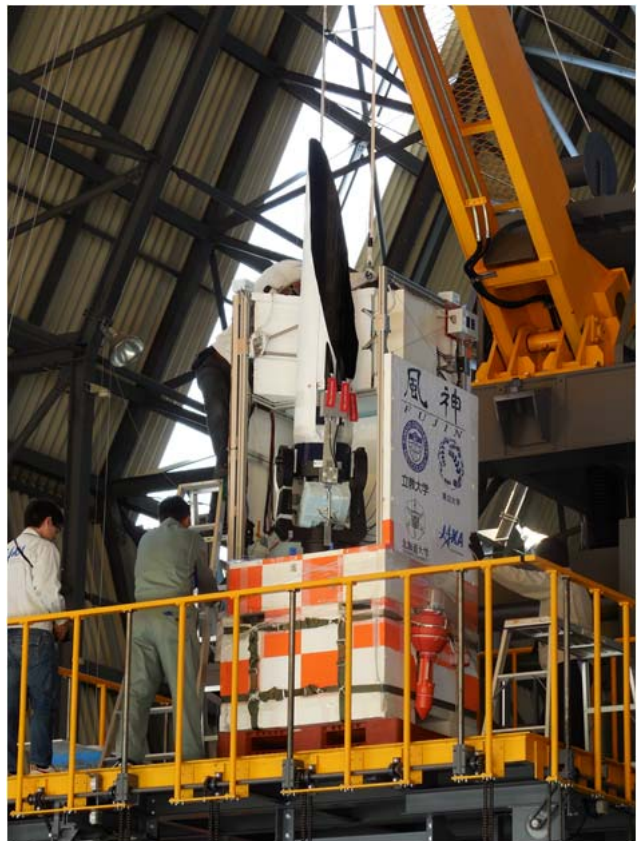


図 1. 放球台上で準備が整った気球搭載望遠鏡システム FUJIN-1。

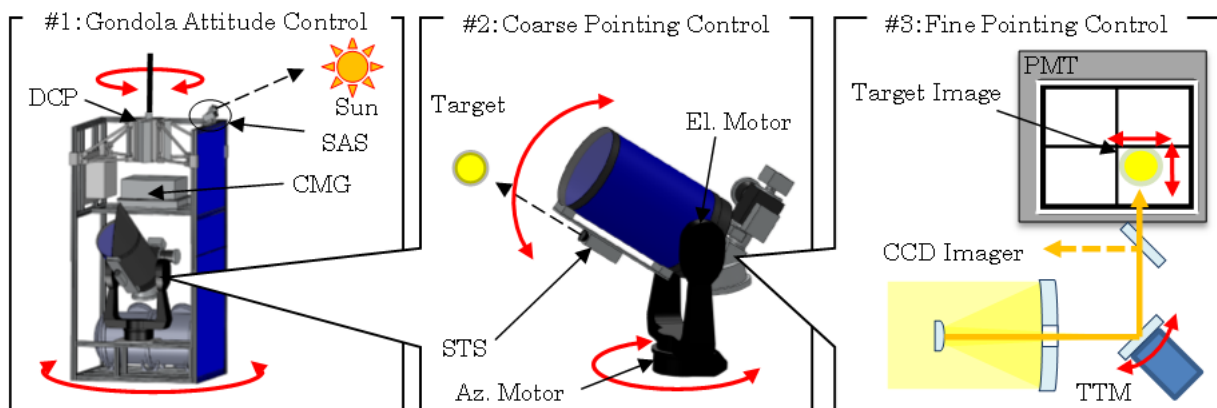


図 2. 3 段階ポインティング制御。

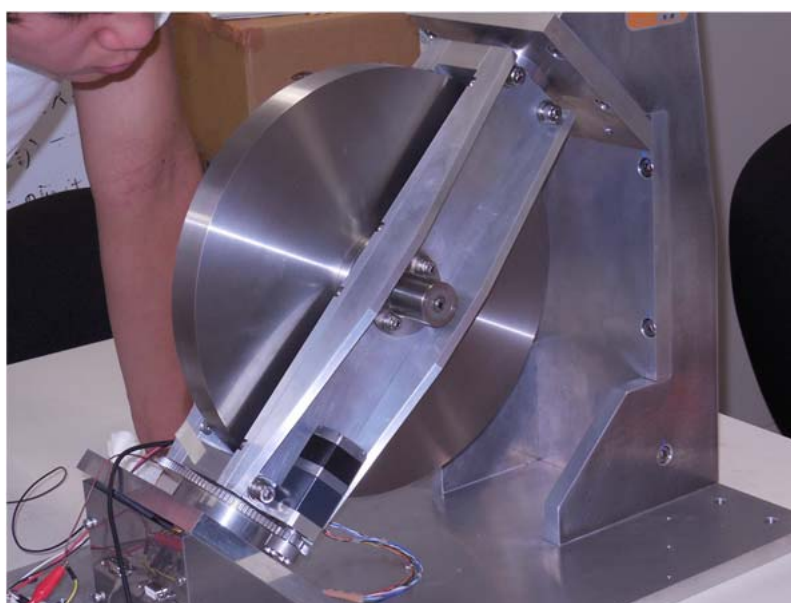


図 3. FUJIN-2 用 CMG。

の場合、スキャンジナビア半島上空での実験と異なり、コマンドアップリンク及びデータダウンリンクのデータレートは 10 kbps オーダーである。そのため、画像データはリアルタイムで全てを地上に降ろすことはできない。HK データと画像データの一部をリアルタイムで降ろし、降ろしきれない画像データは搭載メモリに記録する。

3. 実験計画

表 1 に今後の FUJIN 実験による研究スケジュールを示す。FUJIN-2 用望遠鏡は 2012 年から開発を始めて、すでに完成している。2014 年度上半期で地上試験用の経緯台モーター制御システムを製作した。今後、ハルトマンテストなどの試験及び光学調整を行う。電源系もすでに完成しており、今後、気密容器ができ次第、単体環境試験を実施する。

現在、CMG、DCP、望遠鏡フード、気密容器、CCD カメラ制御装置の設計及び製作を進めている。CMG に関しては試作品が完成しており(図 3)、今後、熱真空試験を実施して、ホイールモーターのトルクや動作温度が適切であるか確認する。2014 年末には全サブシステムがそろい、インテグレーションして総

合試験を実施できる状態になる予定である。

2015年8月に金星は内合を迎え、その前後が視直径が大きく観測好機である。2015年7月末までに観測機材をキルナに輸送し、8月から現地でFUJIN-2の組立、調整、試験を実施し、中旬から気球実験に備える。気球放球から回収まではESRANGEが担当する。

2016年6月6日に金星が外合となる。そのため、FUJIN-3実験は夏季のできるだけ早い時期が金星観測の好機である。上空風の場合と金星観測ウィンドウの兼ね合いで、7月に実験を予定している。金星は外合直後のため視直径は小さいが昼面のほぼ前面が見える。FUJIN-3実験で最長で2週間にわたって主に金星画像が紫外から近赤外の複数波長で得られる。低緯度域での金星スーパーローテーションのおよそ4周分のデータとなる。理論計算及びシミュレーションによる研究と合わせて、SO₂及び未知の物質による吸収波長帯画像の比較から、上層雲高度での大気ダイナミクスと紫外吸収物質の生成について研究する。紫外画像に見える全球規模パターンを抽出し、大気波動によるスーパーローテーション駆動メカニズムの仮説を検証する。また、短波放射の全量を導出し、探査機や地上観測で得られた赤外放射と比較することで、金星大気の熱収支を推定する。

参考文献

Shoji, Y., M. Taguchi, T. Nakano, A. Maeda, Y. Takahashi, M. Imai, J. Nakamoto, M. Watanabe, Y. Goda, T. Kawahara, K. Yoshida and Y. Sakamoto, Development of the Stratospheric Telescope for Observations of Planets – FUJIN-1 – and Evaluation of the Pointing Control System, JAXA-RR-13-011, 87–105, 2013.

表 1. 研究スケジュール

| | 平成27年度 | | | | | | | | | | | | 平成28年度 | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|---|---|-----------|---|---|----|----|----|---|---|---|--------------|---|---|----|---|---|----|----|----|---|---|---|----|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | |
| 気球実験 | ▲ターンアラウンド気球実験@キルナ | | | | | | | | | | | | ▲極周回気球実験@キルナ | | | | | | | | | | | | |
| 観測機器 | フード製作 | | | 補修・再調整・点検 | | | | | | | | | フライトデータ解析 | | | | | | | | | | | | |
| 製作・保守・試験 | 総合試験 | | | 輸送 | | | | | | | | | 総合試験 | | | 輸送 | | | | | | | | | |
| データ解析 | フライトデータ解析 | | | | | | | | | | | | フライトデータ解析 | | | | | | | | | | | | |
| | 画像データ解析 | | | | | | | | | | | | 画像データ解析 | | | | | | | | | | | | |
| 金星 | 内合 | | | | | | | | | | | | 外合 | | | | | | | | | | | | 内合 |
| | 平成29年度 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | |
| | 研究成果取りまとめ、発展研究計画作成 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |