

# 気球搭載望遠鏡による惑星大気観測－B13-02 気球実験報告－

田口 真・前田惇徳(立教大学理学部)

吉田和哉・坂本祐二・中野壽彦(東北大学大学院工学研究科)

荘司泰弘(宇宙科学研究所大気球実験室)

高橋幸弘・渡辺 誠・仲本純平・今井正堯(北海道大学大学院理学研究院)

合田雄哉・川原健史(北海道大学理学部)

## 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。口径 300 mm クラスの小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。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。プロジェクトの名称を風神(FUJIN)と名付けた。

2012 年度第二次気球実験でシステム性能を確認するためのフライト(FUJIN-1)を予定していたが、上空の風の状況がフライトに適さなかったために延期された。2013 年度第一次気球実験でフライトを予定していたが、直前の気球実験において発生した気球バスシステムの不具合の検証試験のため、我々の気球実験は再び見送られた。本稿では、新規に改良を加えた点を中心にシステムの概要及び今後の計画を報告する。

## 2. 気球搭載望遠鏡システム

図1に 2013 年度第一次気球実験の際に、大樹航空宇宙実験場の組立室内で放球準備が整った FUJIN-1 ゴンドラの全体写真を示す。

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。その上段に姿勢制御用コントロールモーメントジャイロ(CMG)、下段に望遠鏡及び PC 等を納めた気密容器を配置する。望遠鏡を下に配置する理由は電力消費や太陽直達光による発熱によるシーイングの悪化を避けるためである。ゴンドラは回転動力を備えたよりもどし機構(DCP)を介して気球と接続される。DCP の上下間の電氣的接続のためにスリップリングを備えている。

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。公称最大出力 125W、最大出力時動作電圧 17.4 V、同電流 7.20 A の多結晶シリコン太陽電池パネル(京セラ社製 KC-125TJ) 2 枚が上下に並べてゴンドラ側面に取り付けられている。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。3.7 V 25 Ah のリチウムイオン電池を 2 個並列に接続し、それをさらに 7 組直列に接続することで、25.9 V 50 Ah を得ている。リチウムイオン電池及び充電回路は防水箱に納められている。太陽電池パネルからの出力がなくても、バッテリーのみで 6 時間以上の動作が可能である。電源系には着水前に電源を遮断するため



図1. 放球準備が整った気球搭載望遠鏡システム FUJIN-1。

のスイッチを備える。また、電源ラインはすべて防水処置がされている。

上記メインの電源とは別に、2軸可動ミラーマウント(TTM)及び光電子増倍管(PMT)が納められた気密容器保温用のヒータ電源として、27.6 V 9 Ah のニッケル水素充電電池を備える。ヒータ電力はサーモスタットにて制御される。

ゴンドラ方位角はコントロールモーメントジャイロとよりもどし機構により $\sim 0.5^\circ$ 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。速度制御のため、ジャイロを搭載する。中緯度での実験では姿勢検知用として地磁気センサーのみで可能だが、将来の極域での実験では地磁気センサーは精度が悪くなるため、代わりにサンセンサーを使う。そのための予備実験として大樹町での実験でも日照中はサンセンサーを使う。ゴンドラの姿勢及び望遠鏡の経緯台はオンボード FPGA 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 $25^\circ$ 以上であれば、太陽光は太陽電池パネルに遮られて望遠鏡に直接当たらない。それ以下の場合でも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。2013 年度の第一次実験では金星が太陽に $15^\circ$ まで近づいているので、長いフードを取り付けた。望遠鏡視野内での目標天体の追尾誤差は光学系の途中に配置した TTM でリアルタイム補正される。

光学系は市販の口径 300 mm シュミットカセグレン望遠鏡(MEADE 社製)を用いる。合焦機構はモータ

で遠隔操作可能である。カセグレン焦点手前で光路を波長によって3つに分ける。波長 450 nm 以下及び波長 750 nm 以上の光はそれぞれ個別のデジタル CCD ビデオカメラでビデオ撮像される。波長 550~630 nm の光は4分割アノード付位置検出光電子増倍管に導かれ、そこから出力される天体の位置検出信号を TTM 制御に用いる。TTM 及び PMT は高電圧を使用するため1気圧封じとする。

FPGA は TTM、PMT へ供給する高圧電圧、望遠鏡焦点調節機構を制御する。

デジタルビデオ信号はアナログ信号化されてリアルタイムで地上に降ろされると同時に搭載 SD メモリーに記録される。DC/DC コンバータ、TTM 用電源、プリアンプは1気圧封じ容器に収納される。気密容器は成層圏気圧下での動作を保証すると同時に、着水時に内蔵する電子機器を浸水から守る。

発泡スチロールフロートが着水後の浮力を発生する。発泡スチロールフロートは着水時の緩衝材も兼ねる。

### 3. 実験経過

PI 班は 2013 年 5 月初めから大樹航空宇宙実験場において実験準備作業を行い、5 月末にはフライトレディー状態に至った。しかし、直前の大型気球実験において、気球バス系の不具合が発生した。その原因究明の地上検証試験が最優先とされ、第一次実験、第二次実験期間ともに我々の実験はキャンセルされた。

### 4. 地上試験結果

第一次実験の準備期間及び第二次実験の期間に FUJIN-1 の姿勢制御と目標天体捕捉・追尾の性能確認のために、地上試験を実施した。その結果概要を以下に報告する。

ゴンドラを門型クレーンで懸垂した状態で、ゴンドラの姿勢制御(第一段階)と目標天体捕捉(第二段階)の統合試験を実施した。気球及びゴンドラが異なる角速度で回転してゴンドラ吊紐がよじれる外乱をローテーターによって与えた。外乱は振幅 $\pm 1/78$  rpm、周期 300 sec の回転運動であった。豆電球を太陽と目標天体のダミーとして使用した。その結果、姿勢角の目標値からの誤差は外乱回転速度周期に一致する 300 sec で変動し、振幅は 1.5~2.0°付近であった。外乱回転を入力した状況での望遠鏡の指向精度は、方位角方向が 36"rms、仰角方向が 42"rms であった。仰角方向は、外乱の有無に関わらず、周期 3~4 sec のほぼ一定の振動が継続する状態となった。これは望遠鏡駆動によってゴンドラに振り子運動を励起していると考えられる。北極での本格実験を目指した次のステージである FUJIN-2 では 3 軸 CMG によって仰角の振動をキャンセルすることを検討している。

次にレーザーをスターセンサー及び主望遠鏡の光源として利用して、三段階統合試験を実施した。ゴンドラを門型クレーンにより、長さ 1 m のケブラーロープで吊り下げた。ゴンドラはバラスト無し、保安機器類、ピギーバック観測機器は取り外した状態で、総重量は 487.5 kg であった。気球からの外乱回転を模擬するためのローテーターをクレーンと吊紐間に配置した。2 本のレーザービームをコリメートし、望遠鏡粗指向制御(スターセンサー)、精指向制御(TTM)の目標として使用した。ある 2 分間に、精指向制御に関しては方位角方向が 64%、仰角方向が 23%の期間で有効であり、そのときの追尾エラーは方位角が 1.7"rms、仰角が 4.1"rms であった。いずれも目標とする値よりも大きいので、さらに補正精度を上げる必要がある。

### 5. 今後の計画

地上試験によって、一部目標値に達していない項目もあるが、姿勢制御と天体捕捉・追尾に関する技術を含めた FUJIN の基礎技術は確認できたと判断し、今後、国内での気球実験はスキップして、北極での本

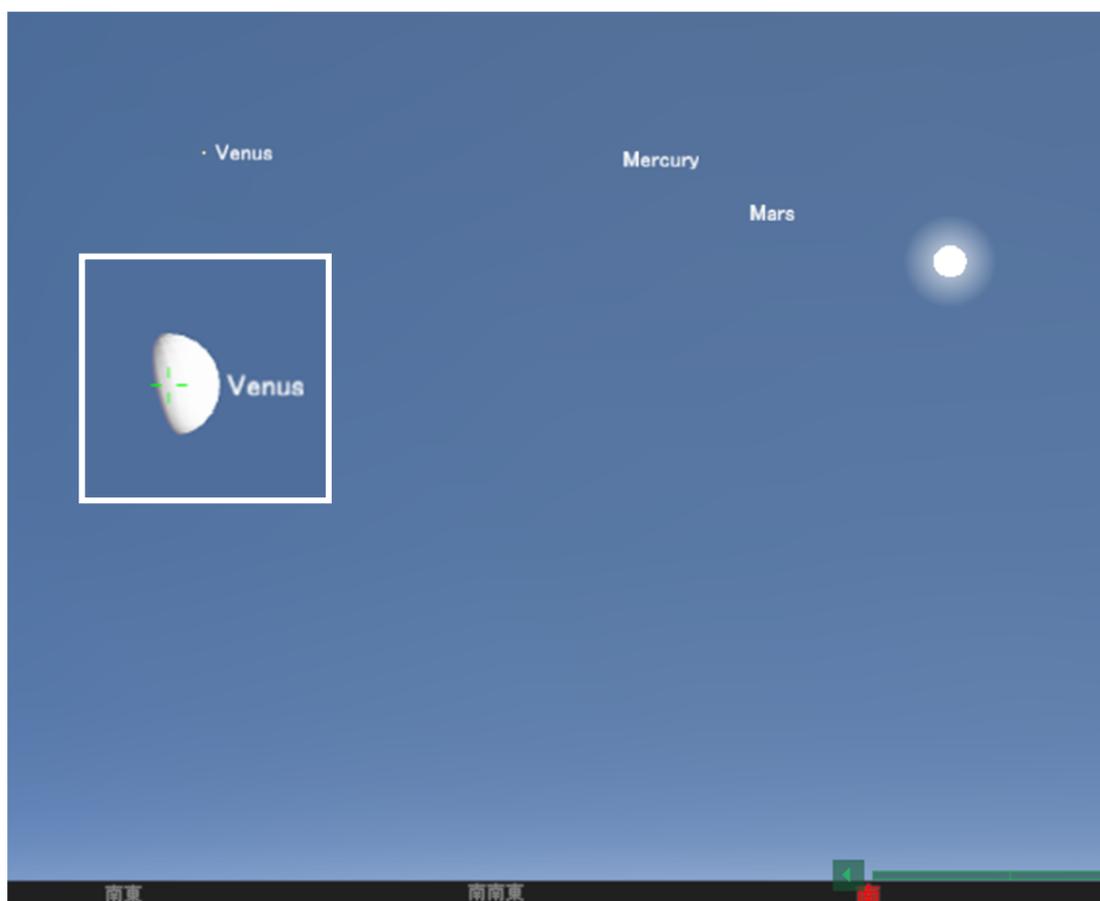


図2. 2015年4月30日12:00:00LT スウェーデン・キルナにおける太陽、惑星の位置関係。

格的な実験に進むこととした。2014年度は実験準備にあて、2015年4/5月にスウェーデン・キルナにおいて金星の観測を計画している。その時期の金星を含めた惑星の位置関係を図2に示す。金星は太陽の東側の最大離角に近く、観測好機である。

北極での実験に使用する新しいカセグレン式望遠鏡を製作している。口径は400mm、合成Fは30~40の可変である。経緯台は逆さフォーク式で、ナスミス焦点2カ所を備える。2013年度中に分光部を完成させる。電源系、姿勢制御系、構造系、カメラは新たに設計・製作する。2014年12月までに各種試験を実施し、性能を確認する予定である。