

惑星大気・プラズマ圏現象の長期連続観測を目指した 極周回成層圏テレスコープの開発

Development of a polar stratospheric telescope for long-term observations of planetary atmospheres and plasmaspheres

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者	立教大学	田口 真	Rikkyo University	Makoto TAGUCHI
協同研究者	北海道大学	高橋幸弘	Hokkaido University	Yukihiro TAKAHASHI

Phenomena in the planetary atmospheres and plasmaspheres have been studied by various methods using emissions emitted from there in the spectral regions from radio wave to X-ray. A balloon-borne telescope is proposed as a new platform for optical remote sensing of planets. Since it is floated in the stratosphere, fine weather condition, excellent seeing and high transmittance of the atmosphere in the near ultraviolet and infrared regions are expected. Especially a planet can be continuously monitored by a long-period circumpolar flight. For these reasons we have been developing a circumpolar balloon-borne telescope system FUJIN for planetary observations. The FUJIN-1 experiment targeting Venus was scheduled to be conducted in Taikicho in Hokkaido in May/June 2013 for function test of the system. The prelaunch ground-test results showed its high attitude control and pointing performance enough for achieving the requirements under the stratospheric condition. Unfortunately the experiment was canceled, because a serious trouble happened in the bus system of the balloon experiment prior to our one. The FUJIN-2 gondola is being designed for a future long-duration experiment in Kiruna in Sweden. The FUJIN-2 experiment is planned to be conducted at ESRANGE in April/May 2015 for a 24 to 48 hours flight.

研究目的

我々は望遠鏡による光学観測を通じて惑星大気・プラズマの研究している。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満足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うえに大気密度が地上の 1/100 以下になるため、地上と比較し

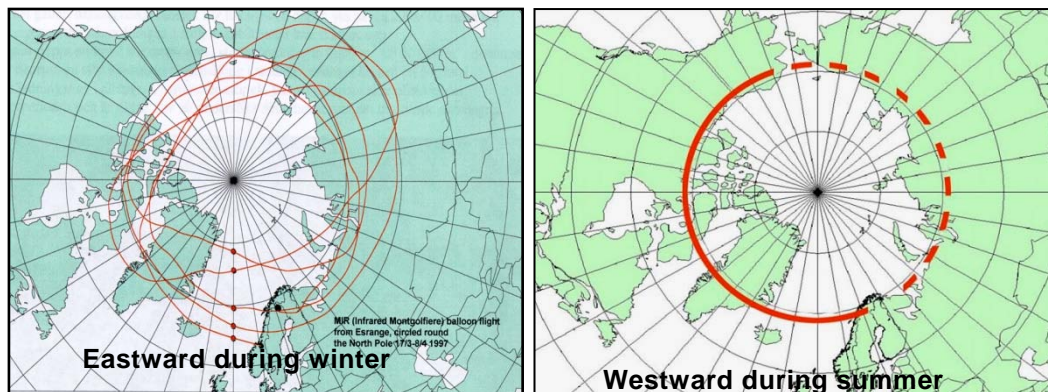


図 1. 極周回成層圏テレスコープの航跡予想図。スウェーデン・キルナにある民間の気球放球場 ESRANGE から放球した場合、夏期（右）は東風に乗ってグリーンランド・カナダ・アラスカ・ロシア上空を通過する。冬期は（左）は西風になるので逆回りとなる。

てシーイングが格段に向上することに着目した。口径 200 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の観測が期待される。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的に観測可能なウィンドウが存在し、図 1 に示すように、風の条件が適する放球日を選べば、極周回風に乗ってほぼ等緯度を地球一周して放球地点まで戻すことも可能である。そこで、我々は地上大型望遠鏡や衛星望遠鏡の 1/100 以下のコストでそれらと並ぶ性能を発揮する第三の惑星観測望遠鏡として、極周回成層圏望遠鏡を提案した。最終的には、極周回成層圏望遠鏡によって、諸惑星表面を連続観測しそれらの大気・プラズマの物理を研究することを目的とする。

研究経過

1. 極周回成層圏望遠鏡システム

我々は 2002 年から極周回成層圏望遠鏡の開発を開始した。2009 年にシステムの性能確認を目的として最初の気球実験を実施したが、搭載コンピュータの不具合のため満足な実験結果を得ることができなかった。その後、不具合箇所の改修を施した上で、新たに開発したシステムを FUJIN-1 と名付けた。図 2 に 2013 年度第一次気球実験の際に、大樹航空宇宙実験場で放球時の姿に組み上げられた FUJIN-1 の全体写真を示す。我々は極域での本格観測を目指した極周回成層圏望遠鏡を並行して開発中である。そちらは FUJIN-2 と名付けた。2009 年の気球実験で使用した機材（プロトモデル）及び FUJIN-1、FUJIN-2 の比較表を表 1 に示す。

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及びバッテリー、下段に PC 等を納めた気密容器と望遠鏡を配置している。望遠鏡の視野を確保するためにゴンドラ中心軸よりややオフセ

ットした位置に望遠鏡を設置している。ゴンドラはよりもどし機構を介して気球と接続される。よりもどし機構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。

ゴンドラは特定の側面を常に太陽方向に向けて姿勢を安定化する。太陽電池パネルは常に太陽を向く側面に取り付けられ、望遠鏡に直接太陽光があたらないように日除けの役割もする。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。太陽電池がなくても、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。

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



図 2. フライトレディー状態の気球搭載望遠鏡システム。

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用する。そのための試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用する。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(～0.028°)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スターセンサーを2台備える。スターセンサーの視野はそれぞれ 5.6°×4.2°及び 0.93°×0.70°である。望遠鏡は高度角 0°～70°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°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。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2軸可動ミラーマウントでリアルタイム補正される。

光学系は市販の口径 300mm 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 450nm 以下及び波長 750nm 以上の光はそれぞれ個別のデジタル CCD カメラで撮像される。波長 550～630nm 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2軸可動ミラーマ

表 1. プロトモデル、FUJIN-1、FUJIN-2 の比較

	プロトモデル	FUJIN-1	FUJIN-2
目的	技術試験	←	科学観測
観測対象	金星	金星、(木星、水星)	金星、木星
望遠鏡	300 mm シュミットカセグレン	←	400 mm カセグレンナスマス焦点
観測波長	400 nm 及び 900 nm	←	10 波長(TBD)
検出器	CCD カメラ 2 台	←	CCD カメラ 1 台
方位角制御	コントロールモーメント ジャイロ及びアクティブ デカップリングモーター	←	←
電源	太陽電池及び NiMH 電池	太陽電池及びリチウム イオン電池	←
寸法	1.3 m (W)×1.3 m (D)× 3.3 m (H)	←	TBD
重量	778 kg	790 kg	TBD
消費電力(観測時)	283W	72.2W	TBD
アップリンク	シリアル 1 系統 接点 12 系統	シリアル 1 系統 接点 4 系統	TCP/IP
ダウンリンク	シリアル 1 系統 アナログビデオ 1 系統	←	TCP/IP
放球場所	大樹航空宇宙実験場(北 海道広尾郡大樹町)	←	ESRANGE(スウェーデン・ キルナ)
放球日	2009 年 6 月 3 日	2012 年 8 月(中止) 2013 年 6 月(中止)	2015 年 4-5 月(予定)

ウント制御に用いる。2 軸可動ミラーマウント及び光電子増倍管は高電圧を使用するため1 気圧封じの気密容器に収納されている。

FPGA は2 軸ミラーマウント、光電子増倍管へ供給する高圧電圧、望遠鏡焦点調節機構を制御する。

CCD カメラからの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、2 軸可動ミラーマウント用電源、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。

2. 実験経過

2012 年5 月までに相模原の宇宙科学研究所において FUJIN-1 の地上試験を完了し、6 月に大樹航空宇宙実験場に移動し、実験準備作業を行った。8 月3 日にゴンドラを放球台へ移動し、最終噛合試験ですべて正常であることを確認した。その後、8 月中旬まで地上及び高層気象が放球に適する日を待ったが、条件が整わず、実験を見送ることとした。

実験機材は一旦全て宇宙科学研究所に引き上げ、2013 年4 月までスターセンサーの増設、CCD カメラアナログビデオ出力の階調増、フードの新調などマイナーな改修及び地上試験を行った。

2013 年5 月2 日より再び大樹航空宇宙実験場において実験準備作業を進め、5 月末にはフライトレディー状態になった。今回の気球実験では金星及びオプションで木星と水星をターゲットとした機能確認試験を計画していた。しかし、残念ながら、我々の実験の直前に実施された大型気球実験において、気球バス機器側に深刻な不具合があり、我々の実験はまたもやキャンセルされた。

考察

2012 年度、2013 年度と2 年続けて気球実験

の準備を進めて、フライト直前の状態まで仕上げたが、実際のフライトは外的要因のために実現しなかった。しかし、それまでに実施した数多くのまた長時間に及ぶ地上試験の結果、実際の成層圏環境下で FUJIN-1 は所定の性能を発揮すると自信を持って言える。北極での本格観測のスケジュールを勘案すると、国内実験にこれ以上労力をかけても、得られるものは少ないと判断している。これまでの実験成果のレビューを近々実施し、次のステップに進むことを予定している。

2015 年度以降、北極での本格的実験に供する新しい極周回成層圏望遠鏡 FUJIN-2 の開発を進めている。2011 年度に新しいカセグレン式望遠鏡を製作した。口径は 400 mm、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。現在、望遠鏡に取り付ける分光装置の設計を進めており、今年度内に完成する予定である。望遠鏡の大型化に伴って、ゴンドラ全体の構造も再設計・再製作する。システムの基幹部分の設計思想は FUJIN-1 のそれを踏襲する。

2015 年4-5 月に ESRANGE にて金星を観測対象とした1-2 日間の長時間連続観測を計画している。本研究助成によって科学的な成果は得られなかったが、次のステップへ進む準備を整えることができた。

研究の発表

口頭発表

1. 田口 真 他：気球搭載望遠鏡による惑星大気観測、大気球シンポジウム、相模原、2011 10
2. 山元夢摘 他：気球搭載望遠鏡による惑星大気観測、地球電磁気・地球惑星圏学会第130 回講演会、神戸、2011 11
3. 山元夢摘 他：気球搭載望遠鏡による惑星大気の観測、宇宙科学シンポジウム、相模原、2012 1
4. 荘司泰弘 他：1mφ 級気球望遠鏡による惑星長時間観測のフィジビリティスタディ、宇宙科学シンポジウム相模原、2012 1
5. T. Nakano et al.: Performance Evaluation of Pointing Control System of the Balloon-Borne

Telescope, 13th ISCOPS, Kyoto, 2012 5

6. T. Nakano et al.: The Pointing Control Method of Balloon-Borne Telescope Compensating the Motion of Flexible Base, 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Fukuoka, 2012 12
7. Y. Shoji et al.: A balloon-borne telescope for planetary observations, The 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, India, 2012 7
8. 田口 真 他：極周回成層圏テレスコープによる惑星大気観測、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学、2012 9
9. 田口 真 他：B12-03「気球搭載望遠鏡による惑星大気観測」実験経過報告、2012 年度大気球シンポジウム、宇宙科学研究所、2012 10
10. 山元夢摘 他：気球搭載望遠鏡による惑星大気観測、第 132 回 SGEPPS 総会および講演会、札幌コンベンションセンター、2012 10
11. 山元夢摘 他：極域周回成層圏テレスコープ(FUJIN)による惑星大気観測、宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所、2013 1
12. M. Taguchi et al.: Observation of Planets by a Circumpolar Stratospheric Telescope, Symposium on Planetary Science 2013, Sendai, 2013 2

誌上発表

1. T. Nakano, et al.: Performance evaluation for pointing control system of the balloon-borne telescope, *Advances in the Astronautical Sciences*, 146, 381-391, 2013
2. T. Nakano et al.: The pointing control method of balloon-borne telescope compensating the motion of flexible base, 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 313-318, 2012