

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03734

研究課題名(和文) 極周回成層圏望遠鏡(風神)を用いた金星大気変動現象の研究

研究課題名(英文) A study on temporal variation of the Venus atmosphere using a circumpolar stratospheric telescope FUJIN

研究代表者

田口 真 (TAGUCHI, Makoto)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：70236404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：惑星大気・プラズマの観測を目指した極周回成層圏望遠鏡FUJIN-2を開発した。最初の科学目標は金星大気力学、化学過程、紫外吸収物質の同定とした。FUJIN-1の実験データに基づいて、光学系、電源系、姿勢制御系の製作及び調整を完了した。スウェーデン・キルナにあるESRANGEにおいて気球実験を実施するため、資金調達の提案をしている。金星大気に関する科学成果としては、金星探査機「あかつき」中間赤外カメラによる大規模定在温度構造の発見が上げられる。観測データの詳細な解析から、それらは太陽放射をエネルギー源として地上付近で発生した大気重力波が雲頂高度まで伝播して形成されたと推測される。

研究成果の概要(英文)：The circumpolar stratospheric telescope FUJIN-2 has been developed for observations of planetary atmospheres and plasmas. The dynamics, chemistry and identification of an UV absorber of the Venus atmosphere are selected as the first scientific target. Development of the hardware of FUJIN-2 has been promoted based on the experimental data obtained by FUJIN-1. Development of the optics, electrical and attitude control systems has been completed. A balloon experiment at ESRANGE in Kiruna, Sweden has been proposed. As an important scientific result about the Venus atmosphere large stationary thermal structures have been discovered by the Longwave Infrared Camera onboard the Venus orbiter Akatsuki. From detailed analysis of the observed data it is suggested that atmospheric gravity waves generated in the lower atmosphere by the solar radiation energy propagate to the cloud-top altitudes forming the structures.

研究分野：惑星大気物理学

キーワード：気球実験 惑星 リモートセンシング 大気力学 大気化学

1. 研究開始当初の背景

惑星大気やプラズマの研究では現象の時間変化を捉えることが本質的に重要である。しかし地上大型望遠鏡はマシンタイムが限られており、1週間以上連続して観測することは不可能である。一方、比較的自由に利用できる国内の中小型望遠鏡はシーイングや天候からの制約のため観測要求を満たす精度で観測ができない。地上観測では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、また赤外領域は水、炭酸ガス、メタンなどの大気微量成分による吸収帯が存在するため、それらの波長帯の観測は困難である。一方、探査機による直接探査や望遠鏡衛星を利用した遠隔観測は惑星現象の時間変動研究に大きな成果が期待できる代わりに、高度な技術開発や高い経済的コストが課せられる。

これらの問題点を打開するために、望遠鏡をゴンドラに搭載し大型気球で極域成層圏に浮遊させ惑星の連続観測を実現するというコンセプトに基づき、第三の惑星観測プラットフォームとして「極周回成層圏望遠鏡」(風神(FUJIN))の構想が生まれた。

FUJINが浮遊する高度を32 kmとすると、対流圏に多く存在する水や炭酸ガスの吸収はほとんど受けなくなる。また、オゾン層のピーク密度は高度25 km付近にあるため、オゾンによる吸収もかなり弱くなり、波長300 nmでの観測が可能になる。大気中の他の分子や微粒子による吸収・散乱もほとんど無視できる値となる。したがって、近紫外領域よりも長波長領域では、FUJINで観測できる波長範囲は衛星望遠鏡のそれに匹敵する。

成層圏からの惑星観測の第二の利点として、特に極域では、日周運動で惑星が地平線下に没することがないため、24時間以上、惑星を連続的に観測可能な点が上げられる。夏季または冬季に極域成層圏に吹く風を利用すると、極を中心に気球を周回させることができる(図1)。極周回実験により、数週間惑星を連続して観測することが可能である。

第三に、成層圏ではほとんど快晴で、望遠鏡の回折限界の性能を発揮できる良好なシーイングが期待できる。可視光で1"の回折限界の角度分解能を与える望遠鏡有効口径は約130 mmであるが、地上で1"以下の角度分解能を実現するシーイング条件が得られる

観測場所と時期は限定される。しかし、例えば高度32 kmでは地上に比べて大気密度は約1/100になるので、それだけ大気密度揺らぎも小さくなり、より大きな有効口径の望遠鏡で回折限界の角度分解能が期待できる。

このように、極周回成層圏望遠鏡による惑星観測は光学性能や観測条件上の多くのメリットがある上、地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡よりも遙かに低コストで実現できる。極周回成層圏望遠鏡は宇宙望遠鏡とほぼ同等の光学性能を持ち、回収してメンテナンスや拡張・改良が可能な点ではそれを遙かにしのぐメリットを持つ。

このような発想に基づき、我々の研究グループは平成14年から極周回成層圏望遠鏡の開発を進めてきた[Taguchi et al., 2007; 2010, Sakamoto et al., 2008, Nakano et al., 2010; 2012, Shoji et al., 2010]。平成21年に機器性能評価を目的とした気球試験を実施したが、搭載コンピュータの不具合のため、予定していた性能評価ができなかった。その後、装置に改良を施し、FUJIN-1実験として平成24年及び25年に放球直前の段階まで準備を整えた。気球実験は諸事情により実施できなかったが、様々な地上試験によってゴンドラ姿勢制御及び高精度ポインティング技術に関する知見が得られた。平成23年からは、平行してその先のFUJIN-2実験で使用される新しい望遠鏡を開発してきた。平成25年に、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]。

2. 研究の目的

本研究では、FUJIN-2ゴンドラを完成させ、スウェーデン・キルナにある気球実験施設ESRANGEにおいて1~2日の飛行時間の実験を行い、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。次に、極周回実験FUJIN-3により、金星及びその他の惑星の2週間以上にわたる連続観測を行う。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

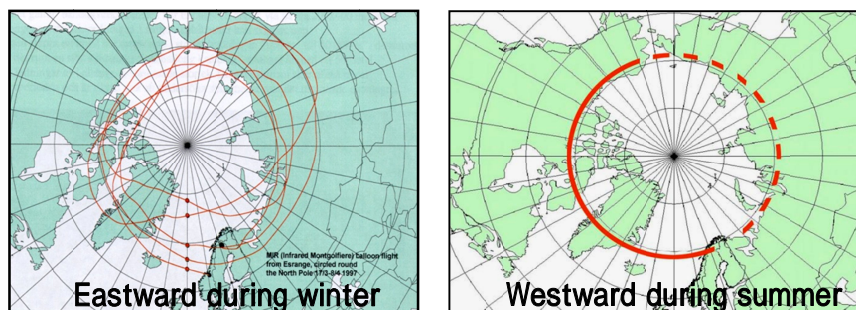


図1 .FUJIN-2の航跡予想。左:冬季、右:夏季(ESRANGE提供)。

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。

3. 研究の方法

すでに開発を進めていた FUJIN-2 にフード回転機構とサンセンサーを付加し、環境試験及び機能試験を実施する。平成 27 年 8 月下旬に ESRANGE において 1~2 日間の飛翔実験を行う。この実験では、FUJIN-2 の姿勢制御、電力収支、各部温度、光学性能を確認し、金星を紫外から近赤外領域での多波長で撮像する。回収したゴンドラを保守整備し、翌年には、FUJIN-3 による極周回実験で 2 週間以上のフライトを実現する。得られた連続画像から金星雲頂領域に存在する未知の紫外吸収物質の生成過程、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、オプションとして、余裕があれば、水星、火星、木星の観測も実施する。最終年は得られた成果をとりまとめ、次のステップへ向けて計画を立てる。

4. 研究成果

FUJIN-1 では地上実験において姿勢制御及び高精度ポインティングに関する詳細なデータを取得した。それらのデータを解析すると同時に、気球とゴンドラの数学モデルを製作し、姿勢制御のコンピュータシミュレーションを行った。FUJIN-1 では鉛直軸周りの 1 軸のみの姿勢制御であったが、FUJIN-2 では 3 軸姿勢制御を導入する(図 2)。その制御パラメータをシミュレーションによって求めた。

FUJIN-2 のハードウェアをサブシステム毎に開発を進めた。光学系に関しては、望遠鏡の副鏡、第 3 鏡、ズームレンズの可動機構やリミッターを製作し、それらの位置や傾きを調整した。CFRP を用いた軽いフードを製作した(図 3)。夜間に星が利用できなくても光軸調整ができるように、レーザーを利用した光軸調整機構を製作した。電源系に関しては、バッテリー及び充放電回路の熱真空試験を実施し、成層圏環境でも問題なく機能することを確認した。また、太陽電池パネルの熱解析を行い、成層圏環境での発電量を見積もった。姿勢制御系としては、コントロールモーメントジャイロ、スターセンサー、サンセンサーを製作し、機能確認試験を実施した。第 3 鏡が搭載される 2 軸可動マウントを低

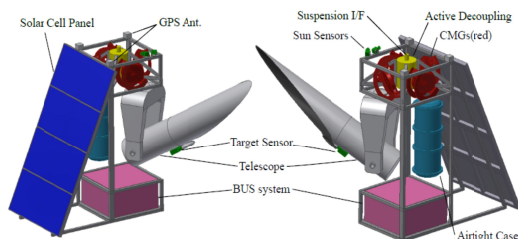


図 2 . FUJIN-2 ゴンドラデザイン。

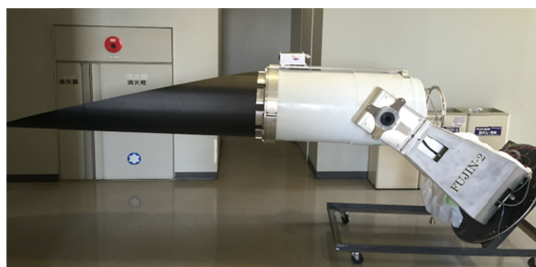


図 3 . CFRP 製フードを取り付けた FUJIN-2 望遠鏡。

大気圧下でも放電しないタイプに変更した。

開発と平行して、ESRANGE で気球実験を行うための資金調達の努力を続けた。JAXA が公募した 2015 年度小規模プロジェクト、2017 年度小規模計画に FUJIN-2 実験を応募した。計画では、ESRANGE で紫外領域の連続撮像及び分光観測によって金星大気ダイナミクス、化学過程、未知の吸収物質の同定を研究対象とする。まず、2019 年に国内で技術実証のための気球実験を実施し、科学観測のための気球実験を 2021 年に実施する計画とした。

本研究課題の科学目的である金星大気力学及び化学過程に関しては、FUJIN-2 による観測としては具体的な成果を上げる段階まで至らなかったが、金星探査機「あかつき」のデータを使った多くの研究成果が発表された。最も大きな成果は、雲頂温度に見られる巨大定在波構造の発見である。その後の、詳しい研究によって、定在波は低緯度の地上にある高地の上空にローカルタイムの正午から夕方までの間のみに見えることがわかった。この事実から太陽光をエネルギー源として地上付近で励起された大気重力波が雲頂高度まで伝播し巨大定在波構造を形成していると推測される。

<引用文献>

Y. Shoji et al., Development of the Stratospheric Telescope for Observations of Planets - FUJIN-1 - and Evaluation of the Pointing Control System, *JAXA-RR-13-011*, 87-107, 2013.

T. Nakano et al., Performance Evaluation for Pointing Control System of the Balloon-Borne Telescope, 13th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS), Kyoto, Japan May15-18, 2012.

T. Nakano et al., The Balloon-Borne Telescope system for optical observation of planets, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, B5-1, Sendai, Japan, December 22, 2010.

Y. Shoji et al., Highly Precise Pointing

Control System on a Balloon-Borne Telescope for Optical Observations of Planets, ISTS Special Issue: Selected papers from the 27th International Symposium on Space Technology and Science, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, **8**, No. ists27, pp. Pm_15-Pm_20, 2010.

M. Taguchi et al., A balloon-borne telescope developed for remote sensing of planets from the polar stratosphere, *JAXA-RR-09-007*, 53-72, 2010.

Y. Sakamoto et al., Dynamic Modeling and Experimental Verification of the Pointing Technology in Balloon-Borne Telescope System for Optical Remote Sensing of Planets, ISTS Special Issue: Selected papers from the 26th International Symposium on Space Technology and Science, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 2008.

M. Taguchi et al., Balloon-borne telescope system for optical remote sensing of planetary atmospheres and plasmas, *Adv. Geosci.*, vol. 7 (Planetary Science), Eds. Anil Bhardwaj et al., pp. 169-179, World Scientific, Singapore, 2007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

S. S. Limaye, M. Taguchi, et al., Venus Looks Different at Different Wavelengths: Morphology of the Global Day and Night Cloud Cover at Different Wavelengths from Akatsuki Cameras, *Earth Planets Space*, 査読有, **70:24**, doi:10.1186/s40623-018-0789-5, 2018.

T. Nakano, M. Taguchi, Y. Shoji, M. Takamura, D. Sunaguchi, M. Imai, M. Watanabe, Y. Takahashi, Y. Sakamoto, and K. Yoshida, Characteristics Evaluation and Performance Improvement Method of Balloon-Borne Telescope Pointing Control System, *31th International Symposium on Space Technology and Science*, 査読有, 2017-m-06, 2017.

T. Fukuhara, M. Taguchi, et al., Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus, *Nature Geoscience*, 査読有, **10**, 85-88, doi:10.1038/NGEO2873, 2017.

T. Kouyama, M. Taguchi, et al., Topographical and Local-Time Dependence of Large Stationary Gravity Waves observed at the cloud top of Venus, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **44**, 12,098-12,105,

doi:10.1002/2017GL075792, 2017.

Y. Shoji, M. Taguchi, T. Nakano, A. Maeda, M. Imai, Y. Goda, M. Watanabe, Y. Takahashi, Y. Sakamoto, and K. Yoshida, FUJIN-2: Balloon Borne Telescope for Optical Observation of Planets, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 査読有, **14**, ists30, Pk_95-Pk_102, 2016.

〔学会発表〕(計4件)

田口 真, 荘司 泰弘, 中野 壽彦, 高橋 幸弘, 他, 極周回成層圏望遠鏡 FUJIN、平成29年度大気球シンポジウム、相模原、2017年11月9日~10日。

田口 真, 吉田 和哉, 坂本 祐二, 中野 壽彦, 荘司 泰弘, 高橋 幸弘, 渡邊 誠, 他, 極周回成層圏望遠鏡 (FUJIN)による惑星大気観測計画、平成28年度大気球シンポジウム、相模原、2016年11月1日~2日。

A. Maeda, M. Taguchi, Y. Shoji, Y. Takahashi, M. Imai, Y. Gouda, M. Watanabe, T. Nakano, K. Yoshida, and Y. Sakamoto, Development of the Circumpolar Stratospheric Telescope FUJIN for Observations of Planets, Fall Meeting of American Geophysical Society, San Francisco, Dec. 14-18, 2015.

田口 真, 吉田 和哉, 坂本 祐二, 中野 壽彦, 荘司 泰弘, 高橋 幸弘, 渡邊 誠, 他, 極周回成層圏望遠鏡 (FUJIN)による惑星大気観測計画、平成27年度大気球シンポジウム、相模原、2015年11月5日~6日。

6. 研究組織

(1)研究代表者

田口 真 (TAGUCHI, Makoto)
立教大学・理学部・教授
研究者番号: 70236404

(2)研究分担者

吉田 和哉 (YOSHIDA, Kazuya)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00191578

坂本 祐二 (SAKAMOTO, Yuji)
東北大学・大学院工学研究科・特任准教授
研究者番号: 50431523

高橋 幸弘 (TAKAHASHI, Yukihiro)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 50236329

渡邊 誠 (WATANABE, Makoto)
岡山理科大学・理学部・准教授
研究者番号: 10450181

莊司 泰弘 (SHOJI, Yasuhiro)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70582774

中野 壽彦 (NAKANO, Toshihiko)
大分工業高等専門学校・機械工学科・助教
研究者番号：50748986