

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244076

研究課題名(和文) 極周回成層圏望遠鏡による金星大気の研究

研究課題名(英文) Study on the Venusian atmosphere by a circumpolar stratospheric telescope

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) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：惑星大気やプラズマの長時間連続観測を目指し、気球によって北極の成層圏を浮遊する望遠鏡「風神(FUJIN)」を開発した。高精度姿勢制御と目標天体追尾の技術実証を目的とした国内気球実験FUJIN-1は天候不良や気球制御システムの不具合によって実際に気球を飛翔させるまでには至らなかった。しかし、実験準備のための地上試験によってFUJIN-1の初期の目的は達せられたと判断し、北極での本格観測FUJIN-2の開発に進む判断を下した。将来的には地上、衛星に並ぶ第三の望遠鏡プラットフォームとしてメートルクラスの望遠鏡を大気揺らぎがない環境で半ば恒常的に運用する。

研究成果の概要(英文)：A balloon-borne telescope system FUJIN lifted up in the Arctic stratosphere has been developed for a long-term continuous observation of planetary atmospheres and plasmas. FUJIN-1 which was a domestic balloon experiment in order to verify techniques of high-precision attitude control and pointing of a target planet was cancelled twice because of a bad weather condition and an accident in the balloon control system. However, the purpose of FUJIN-1 has been accomplished by ground-based prelaunch tests, and development of FUJIN-2 was started aiming at a long-duration flight in the Arctic. In the future a 1-meter class circumpolar stratospheric telescope will be operated as a quasi-permanent platform in the environment without atmospheric turbulent as ground-based and satellite telescopes.

研究分野：惑星大気物理学

キーワード：極地 航空宇宙工学 リモートセンシング 惑星 大気

1. 研究開始当初の背景

惑星大気圏や磁気圏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「すばる」のような大型望遠鏡はマシンタイムが限られており、数時間以上のタイムスケールで変化する現象の時間変化を連続的に観測することは不可能である。また、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条件によって要求を満たす十分な観測ができない。一方、探査機による直接探査やスペーステレスコープ衛星を利用した遠隔観測が惑星現象の時間変動観測に最も大きな成果が期待できるが、高度な技術開発や巨大な経済的コスト、そして失敗のリスクが課せられる。

これらの問題点を打開して惑星の連続観測を実現するプラットフォームとして、極域成層圏という特異な場所に着目した。極域の成層圏からは、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することができる。さらに日周運動による高度変化が小さいため、大気吸収などの観測条件の時間的な変化が小さいという利点もある。望遠鏡をゴンドラに搭載し大型気球で成層圏に浮遊させればそのような状況が実現できるというアイデアから極周回成層圏テレスコプの構想が生まれた。

夏期または冬期に極域成層圏に吹く風を

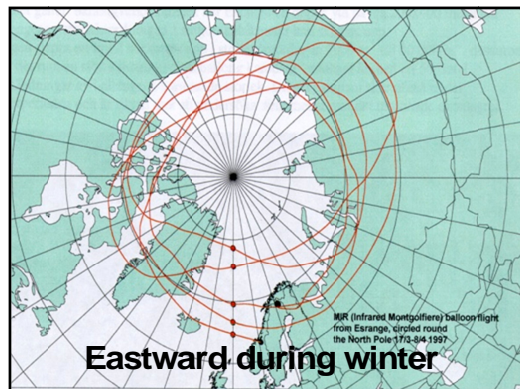
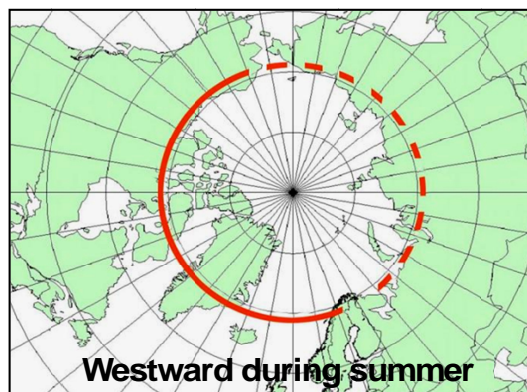


図1 ESRANGE (スウェーデン・キルナ) から放球した場合の気球航跡予想。夏季(上)及び冬季(下)。

利用すると、極を中心に周回させることができ、例えばスウェーデンのキルナから気球を放球すると、北極圏のほぼ等緯度を周回して数週間後に放球点近くに戻ってきたところを回収することが可能である(図1)。現在、国内では JAXA が開発を進めているスーパープレッシャー気球が実用化されれば、半ば恒久的な天文台を極域成層圏に浮かべることも夢ではない。

「すばる」がシーイングや赤外吸収の影響のない成層圏に浮かんで天体を連続観測している様子を想像していただきたい。この研究はそのような夢に向かった第一歩である。

2. 研究の目的

我々の研究グループは平成 14 年から極周回成層圏テレスコプの開発を進めてきた。平成 21 年に最初の機器性能飛翔試験を実施したが、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。本研究期間には、まず、国内気球実験により、極周回成層圏テレスコプシステムの基本性能を確認する。次に北極域での科学観測に投入する新しい望遠鏡を備えた極周回成層圏テレスコプシステムを製作し、スウェーデン・キルナにて1 - 2日の飛翔時間の実験を行い、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。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波長 300 nm で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を探る。また、長時間連続観測のメリットを生かして、これまでの観測で存在がはっきりしていない金星大気中の雷放電発光の検出を試みる。

3. 研究の方法

惑星観測は主に探査機による観測と地上望遠鏡観測とに分けられる。探査機による観測は詳細な空間分布が得られる一方、リソース上観測装置に課される制約、高い製造コスト、失敗のリスク、データ伝送量の制限などデメリットも多い。地上観測は、大型観測装置を使えるが、マシンタイム配分による観測時間の制約や天候・シーイングの影響を受ける。

そこで、本研究では第三の観測方法として、極周回成層圏テレスコプを提案している。これはこれまでに惑星観測には例がない新しい観測手法である。将来的にスーパープレッシャー気球が実用化されれば、極周回成層圏テレスコプを半ば恒久的な世界初の惑星観測専用のスペース天文台として運用することができる。

極周回成層圏テレスコプによる研究対象は、ほとんど全ての惑星や太陽系構成天体に及ぶ。例えば、水星のナトリウムテイルが地上から観測されているが、地上からの水星



図2 FUJIN-1 ゴンドラ（平成25年度仕様）

観測は明るい太陽に邪魔されて日没後または日出前のわずかな時間に行わざるを得ないため、現象の時間変化を追うまでには至っていない。また、金星大気のスーパーローテーションは発見から数十年が経過するが、未だにそのメカニズムは解明されていない。その原因の一つは、大気の動きを連続的に立体的に捉える観測が実現されていないことにある。さらに、惑星のオーロラや雷のような発光現象、火星のダストストーム等は、非周期的に発生し時間的に発展する。このような現象を捉え物理的に理解するためには長時間連続モニタリング観測が不可欠である。極周回成層圏望遠鏡を世界初の惑星観測専用のスペース天文台として運用し、ここに例を挙げたような惑星大気・プラズマ圏現象を研究することが究極の目的である。

4. 研究成果

本研究費で進めている極周回成層圏望遠鏡プロジェクトを「風神(FUJIN)」と名付けた。最初の気球実験 FUJIN-1 は極周回成層圏望遠鏡の機能・性能を確認することを目的として、平成24年8月に北海道の大樹航空宇宙実験場(TARF)での実施を目指して準備を進めた。平成23年度より継続して、宇宙科学研究所においてゴンドラの製作及び環境試験を行い、平成24年6月からTARFでフライト前の最終調整及び動作試験を実施した。8月3日にゴンドラは放球台に移動して放球準備は完了したが、高層風の状態が放球に適さなかったため、実験は見送られた。

実験機材は一旦宇宙科学研究所へ持ち帰り、性能をさらに向上させるために次の改良を施した。既存のスターセンサーに加えて、狭視野のスターセンサーを併設し、望遠鏡視野への天体導入を容易にした。動作保証範囲を下回っていたメモリカードユニット、可動ミラー用電源に、ヒーターを取り付けて能動的に保温するようにした。熱真空試験によって、ヒーターが所定の温度でON/OFFすることを確認した。コントロールモーメントジャイロのリミッタ、ミッションカメラのアナログ出力階調を改良した。

FUJIN-1の次のステップとして、スウェーデン・キルナで本格的金星観測を実施するために、望遠鏡をサイズアップしたFUJIN-2の開発を開始した。FUJIN-2に使用する望遠鏡は口径400mm、合成F30~40のカセグレン式反射望遠鏡である。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。平成24年11月にハルトマンテストを実施した結果、まだ光軸調整が不十分であることがわかった。二軸可動ナスミス鏡を収納する気密容器を製作した。ゴンドラ設計、モータードライバの検討を開始した。また、観測された金星画像データ解析のために、SPICE Toolkitを利用して、金星の座標軸と明暗境界線を作図するプログラムを開発した。

平成25年度はFUJIN-1実験をTARFで実施するために、5月初めから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(図2)。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、FUJIN-1実験は再びキャンセルされた。

気球実験の準備期間に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。ゴンドラ姿勢の目標値からの誤差はおよそ 1.5° ~ 2.0° 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、望遠鏡駆動によってゴンドラに周期3~4secのほぼ一定の振り子運動を励起している状態となった。北極での本格的科学観測を目指した次のステージであるFUJIN-2実験では、三軸CMGによって仰角の振動をキャンセルすることとした。

レーザーをスターセンサーおよび主望遠鏡の光源として利用して、天体追尾性能試験を実施した。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%の期間で制御が有効であり、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を上回っているため、さらに補正精度を向上させる必要がある。

地上試験の結果、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、北極での本格的な実験に

進むこととした。北極での FUJIN-2 実験に使用する望遠鏡の分光部を製作した。電源系で使用するリチウムイオン電池を調達した。また、姿勢制御系の設計を行った。

平成 26 年度は平成 28 年度夏季の北極域での極周回フライトを目指して、FUJIN-2 の製作を進めた。具体的な作業としては、まず、平成 25 年度から継続している太陽電池パネル及びリチウムイオン電池からなる電源系の製作を完了した。サンセンサー、スターセンサー、ミッションカメラに用いる CCD カメラのインターフェース部分を製作した。FUJIN-1 より大型化した FUJIN-2 のゴンドラに対応するために、大型化し、一軸制御から三軸制御に拡張するため 4 機構成になる CMG を設計・試作した。試作された CMG を大気中及び真空槽中で試験した結果、大気中では空気の摩擦抵抗のために所定の回転数が得られないことがわかった。その対策として、CMG ホイールを真空容器に収納するよう設計変更し、部品を製作した。

光学系に関しては、望遠鏡の二軸可動ナスマス鏡が収納される気密容器の配線と気密確認、焦点調節、ナスマス鏡回転ズーム機構を駆動するステッピングモーターのリミッタの調整、ハルトマンテストを実施するための治具の準備を行った。

宇宙科学研究所理学委員会に FUJIN ワーキンググループ(WG)の設立を申請し、それが承認された。WG は宇宙科学研究所が公募する小規模プロジェクトのカテゴリーB(1 億円~10 億円)に応募する資格があり、さっそく平成 26 年度の小規模プロジェクトに応募した。その内容は、平成 27 年夏季にスウェーデン・キルナから FUJIN-2 を放球し、極周回する間に木星を観測する計画である。

その後、本研究の後継となる基盤研究(B)が採択されたので、本研究は最終年度の 1 年を残して終了することとした。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Nakamura, M., Y. Kawakatsu, C. Hirose, T. Imamura, N. Ishii, T. Abe, A. Yamazaki, M. Yamada, K. Ogohara, K. Uemizu, T. Fukuhara, S. Ohtsuki, T. Satoh, M. Suzuki, M. Ueno, J. Nakatsuka, N. Iwagami, M. Taguchi, S. Watanabe, Y. Takahashi, G. L Hashimoto, and H. Yamamoto, Return to Venus of the Japanese Venus Climate Orbiter AKATSUKI, Acta Astronautica, 93, 査読有, 2014, 384-389.

Taguchi, M., and T. Fukuhara, Satellite-borne image sensors using an uncooled micro-bolometer array, J. Jpn Soc. Infrared Science & Technology, 23, 査読有, 2013, 30-37.

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, 査読有, 2013, 87-107.

Nakano, T., R. Fujimura, Y. Sakamoto, K. Yoshida, T. Kuwahara, Y. Shoji, M. Taguchi, M. Yamamoto, and Y. Takahashi, Performance Evaluation for Pointing Control System of the Balloon-Borne Telescope, 13th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS), 査読有, Kyoto, Japan May15-18, 2012.

Taguchi, M., T. Fukuhara, M. Futaguchi, M. Sato, T. Imamura, K. Mitsuyama, M. Nakamura, M. Ueno, M. Suzuki, N. Iwagami, and G. L. Hashimoto, Characteristic features in Venus' nightside cloud-top temperature obtained by Akatsuki/LIR, Icarus, 査読有, 219, 2012, 502-504
10.1016/j.icarus.2012.01.024.

〔学会発表〕(計 17 件)

Maeda, A., M. Taguchi, Y. Shoji, T. Nakano, M. Imai, Y. Gouda, M. Watanabe, Y. Takahashi, Y. Sakamoto, and K. Yoshida, 極周回成層圏望遠鏡による惑星観測 - FUJIN プロジェクト -, 第 15 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2015 年 1 月 6~7 日.

田口 真、前田惇徳、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、莊司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、今井正亮、合田雄哉、極周回成層圏望遠鏡(FUJIN)による惑星大気観測計画、2014 年度大気球シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市), 2014 年 11 月 6~7 日.

Maeda, A., M. Taguchi, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, Y. Shoji, Y. Takahashi, J. Nakamoto, M. Imai, M. Watanabe, and Y. Gouda, The Circumpolar Stratospheric Telescope FUJIN for Observations of Planets, SGPSS Fall Meeting 2014, Kissei Bunka Hall (Nagano, Matsumoto), Oct. 31-Nov. 3, 2014.

Taguchi, M., A. Maeda, T. Nakano, K. Yoshida, Y. Sakamoto, Y. Shoji, Y. Takahashi, M. Imai, J. Nakamoto, M. Watanabe, and Y. Gouda, A Circumpolar Stratospheric Telescope for Observations of Planets - FUJIN, AOGS, Royton Sapporo Hotel (Hokkaido,

Sapporo), Jul. 28 - Aug. 1, 2014.
Maeda, M., M. Taguchi, T. Nakano, K. Yoshida, Y. Sakamoto, Y. Shoji, Y. Takahashi, M. Imai, J. Nakamoto, M. Watanabe, and Y. Gouda, A Circumpolar Stratospheric Telescope for Observations of Planets FUJIN, Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama), Apr. 28-May 2, 2014.
Maeda, M., M. Taguchi, T. Nakano, K. Yoshida, Y. Sakamoto, Y. Shoji, Y. Takahashi, M. Imai, J. Nakamoto, M. Watanabe, and Y. Gouda, Observation of Planets by a Circumpolar Stratospheric Telescope System FUJIN, Symposium on Planetary Science 2014, Tohoku University (Miyagi, Sendai), Feb. 19-21, 2014.
Taguchi, M., A. Maeda, Y. Shoji, Y. Takahashi, M. Imai, J. Nakamoto, M. Watanabe, Y. Gouda, T. Kawahara, T. Nakano, K. Yoshida, and Y. Sakamoto, The Circumpolar Stratospheric Telescope - FUJIN - for Observations of Planets, 第 14 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市) 2014 年 1 月 9~10 日。
田口 真、前田惇徳、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、荘司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、仲本純平、今井正亮、合田雄哉、川原健史、気球搭載望遠鏡による惑星大気観測 - B13-02 気球実験報告 -、2013 年度大気球シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市) 2013 年 11 月 14~15 日。
Taguchi, M., A. Maeda, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, Y. Shoji, Y. Takahashi, J. Nakamoto, M. Imai, M. Watanabe, Y. Gouda, and T. Kawahara, Observation of Planets by a Circumpolar Stratospheric Telescope System FUJIN, SGPSS Fall Meeting 2013, Kochi University (Kochi, Kochi), Nov. 2-5, 2013.
田口 真、山元夢摘、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、荘司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、仲本純平、今井正亮、合田雄哉、川原健史、極域周回成層圏テレスコプ (FUJIN) による惑星大気観測、第 14 回惑星圏研究会、東北大学(宮城県・仙台市) 2013 年 2 月 21 日。
田口 真、山元夢摘、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、荘司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、仲本純平、今井正亮、合田雄哉、川原健史、極域周回成層圏テレスコプ (FUJIN) による惑星大気観測、2012 年度宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市) 2013 年 1 月 8~9 日。

Yamamoto, M., M. Taguchi, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, Y. Shoji, Y. Takahashi, K. Hamamoto, M. Imai, and J. Nakamoto, A balloon-borne telescope for planetary observations, American Geophysical Society Fall Meeting, San Francisco (U.S.A.), Dec. 3, 2012.

Yamamoto, M., M. Taguchi, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, Y. Shoji, Y. Takahashi, K. Hamamoto, M. Imai, and J. Nakamoto, A balloon-borne telescope for planetary observations, SGPSS Fall Meeting 2012, Hokkaido University (Hokkaido, Sapporo), Oct. 20-23, 2012.

田口 真、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、荘司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、仲本純平、今井正亮、合田雄哉、川原健史、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(神奈川県・相模原市) 2012 年 10 月 17 日。

田口 真、吉田和哉、坂本祐二、中野壽彦、荘司泰弘、高橋幸弘、渡辺 誠、仲本純平、今井正亮、合田雄哉、川原健史、極周回成層圏テレスコ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(大分県・大分市) 2012 年 9 月 20 日。

Syoji, Y., M. Yamamoto, M. Taguchi, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, and Y. Takahashi, A balloon-borne telescope for planetary observations, The 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore (India), Jul. 19, 2012.

Yamamoto, M., M. Taguchi, K. Yoshida, Y. Sakamoto, T. Nakano, Y. Syoji, and Y. Takahashi, A balloon borne telescope for planetary observations, Japan Geoscience Union Meeting 2012, Makuhari Messe (Chiba, Chiba), May 20-25, 2012.

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：7 0 2 3 6 4 0 4

(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：0 0 1 9 1 5 7 8

坂本 祐二 (SAKAMOTO, Yuji)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：5 0 4 3 1 5 2 3

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

渡辺 誠 (WATANABE, Makoto)
北海道大学・大学院理学系研究院・特任助教
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