

# 極周回成層圏望遠鏡(FUJIN)による惑星大気観測計画

田口 真・前田惇徳・高村真央(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。このメリットについては次章で詳細に述べる。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。

FUJIN-1 実験は残念ながら放球まで進むことができなかったが、所期の目的は達成されたと判断し、FUJIN-2 実験に進むこととした。FUJIN-1 実験の成果については Shoji et al. [2013]を参照されたい。

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。キルナでは、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日のフライトが可能である。また夏季には、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極周回フライトが可能である。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。

FUJIN-2 は木星大気ダイナミクスの解明を主目的としている。木星極域におけるヘイズ波構造が背景風に対する移動速度、及び全球規模に波構造が広がっている点から、それらの波はロスビー波であることが示唆されている。我々は 890 nm の可視近赤外領域にて最も深いメタン吸収バンドで観測を行うことで木星極域に広がるヘイズ波構造を観測し、また同時に木星における背景風速度を得ることで波構造がロスビー波であると判別させるためのパラメーターを得ることを提案する。また積乱雲の様相とジェット風速を得ることで木星内部の熱源から生じる鉛直方向の熱の輸送の大きさと経度方向の風速の相関を明らかにする。木星大気メタン吸収が可視・近赤外で1番深い 890 nm での観測、また可視光領域(メタン吸収バンドである 619 nm 及び 727 nm)での積乱雲の観測を行うことで、

- ① 極域のヘイズ波構造の数日単位での時間変動及び経度方向への移動速度を 2 m/s の精度で導出する。
- ② 1000～4000 km スケールの積乱雲の観測によって対流圏における背景風速度を 2 m/s の精度で導出する。

③ 2～3 週間のタイムスケールでの対流圏高度での積乱雲の空間分布と背景風速度の相関とその時間変化を導出する。

を得ることを目的とする。

また、2015年12月に金星探査機「あかつき」が金星周回軌道投入に再挑戦する。その後、2年間予定されている「あかつき」による金星観測期間には、いくつかの地上望遠鏡との共同観測が提案されている。FUJIN プロジェクトとしても気球望遠鏡のメリットを生かした共同観測を検討している。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 SO<sub>2</sub> 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種類と成因の同定、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。

FUJIN-2 システムの概要については、Shoji et al. [2013]及び 2014 年度までの本シンポジウム集録原稿を参照されたい。本稿ではこれまで詳細に議論してこなかった、気球望遠鏡観測と地上観測の比較について以下に述べる。

## 2. 気球望遠鏡観測と地上観測の比較

地上の複数地点での観測をつなぎ合わせて惑星を連続観測することを考える。天体からの光の位相が同一と考えられる空気塊の典型的な大きさをフリード長とぶ。フリード長よりも口径が大きい望遠鏡による観測では、天体からの光の位相は場所によって揃っておらず、そのため入射角も微妙に異なると考えられる。それらが空間的・時間的に積分され、検出器上に星像として結像することを考えると、天体は大気の状態を反映して、ある一定の大きさに結像することになる。これをシーイングと定義している。

地上でも高高度で気流が安定しているサイトでは 1”以下のシーイングが実現されている。シーイングが良いとされるサイトのシーイングを表 1 に示す。最良では Cerro Amazones の 0.64”、ハワイとチリは平均的には 0.7”程度である。南アフリカは少し悪くて 1”程度である。これらは波長 500 nm、天頂での値である。シ

表 1 世界の天文観測サイトのシーイング

場所	高度	シーイング[""]	参考文献
Maunakea (Hawaii)	4200	0.69	<a href="http://www.naoj.org/Observing/Telescope/ImageQuality/Seeing/">http://www.naoj.org/Observing/Telescope/ImageQuality/Seeing/</a>
Maunakea (Hawaii)	4200	0.90	Uraguchi et al. (2006), SPIE, 6267, 62670N
Maunakea (Hawaii)	4050	0.75	Skidmore et al. (2009), PASP, 121, 1151-1166
Paranal (Chile)	2635	0.93	Aali Ali et al. (2010), A&A, 524, A73
Paranal (Chile)	2635	0.88	Martin et al. (2000), A&A, 144, 39-44
Las Campanas (Chile)	2550	0.66	Thomas-Osip et al. (2008), SPIE, 7012, 701265
Cerro Amazones (Chile)	3064	0.64	Skidmore et al. (2009), PASP, 121, 1151-1166
Cerro Chajnantor (Chile)	5640	0.69	Motohara et al. (2008), SPIE, 7012, 701244
SAAO (South Africa)	1767	1.23	Gochermann et al. (1999), Exp. Ast., 9, 1-15
SAAO (South Africa)	1767	0.95	Erasmus (2000), Sth. Af. J. Sci., 96, 475
SAAO (South Africa)	1767	1.32	Catala et al. (2013), MNRAS, DOI: 10.1093/mnras/stt1602

シーイングは波長の $-0.2$ 乗、エアマスの $0.6$ 乗に比例する。これらを考慮すると波長 $500\text{ nm}$ 天頂で $0.7''$ のシーイングが得られているとき、FUJIN-2で観測しようとしている木星のメタン吸収帯波長 $689\text{ nm}$ で天頂角に対するシーイングは表2に示す値となる。いずれもFUJIN-2で使用される口径 $400\text{ mm}$ の望遠鏡の波長 $689\text{ nm}$ での回折限界 $0.43''$ よりも大きな値となっている。

表2 波長 $689\text{ nm}$ のシーイングの天頂角依存性

天頂角[°]	シーイング[""]
0	0.60
30	0.65
45	0.74
60	0.91

例えば木星の雲でクラウドトラッキングをする場合、時間差比較する2枚の画像の片方の分解能が悪ければ、悪い方の測定誤差での風速決定となる。ハワイ、チリ、南アフリカのサイトで木星を観測した場合の木星高度角日変化の例を図1に示す。木星の高度が $30^\circ$ 以上の時に観測すると仮定すると、3観測地点のデータをつなぎ合わせると1木星自転周期以上の連続観測が可能である。しかし、シーイングは高度 $30^\circ$ で $0.91''$ となり、回折限界 $0.43''$ の2倍以上の値に劣化する。さらに、南アフリカのシーイングは $1''$ 程度であるので、エアマスの効果を考慮するとシーイングは $1''$ を超える。

一方、FUJIN-2で目指している高度 $32\text{ km}$ では天頂のエアマスが $0.01$ 、天頂角 $80^\circ$ でもエアマスは $0.056$ であるので、シーイングの影響は無視できる。

フリード長よりも小さい口径の望遠鏡で天体を観測した場合は、ある瞬間の天体からの光の位相は揃っていて、すべての光線は一定の入射角で入射すると考えられる。しかし微小時間が経過すると、望遠鏡の開口上の大気は移動し、前回とは異なる位相・入射角で天体の光は入射することになる。そのため、小口径で短時間露出すると、その位置がゆらゆらと揺れて見えることになる。この現象をダンシングと呼ぶ。ダンシングのみであれば、FUJIN-2で採用している2軸可動ミラーによるリアルタイム位置補正機構の導入で補正できる可能性がある。しかし、フリード長は、シーイング $1''$ のとき約 $100\text{ mm}$ 、シーイング $0.5''$ のとき約 $200\text{ mm}$ である。FUJIN-2で使用される望遠鏡の口径はシーイング $0.7''$ のフリード長よりも十分に大きいため、シ

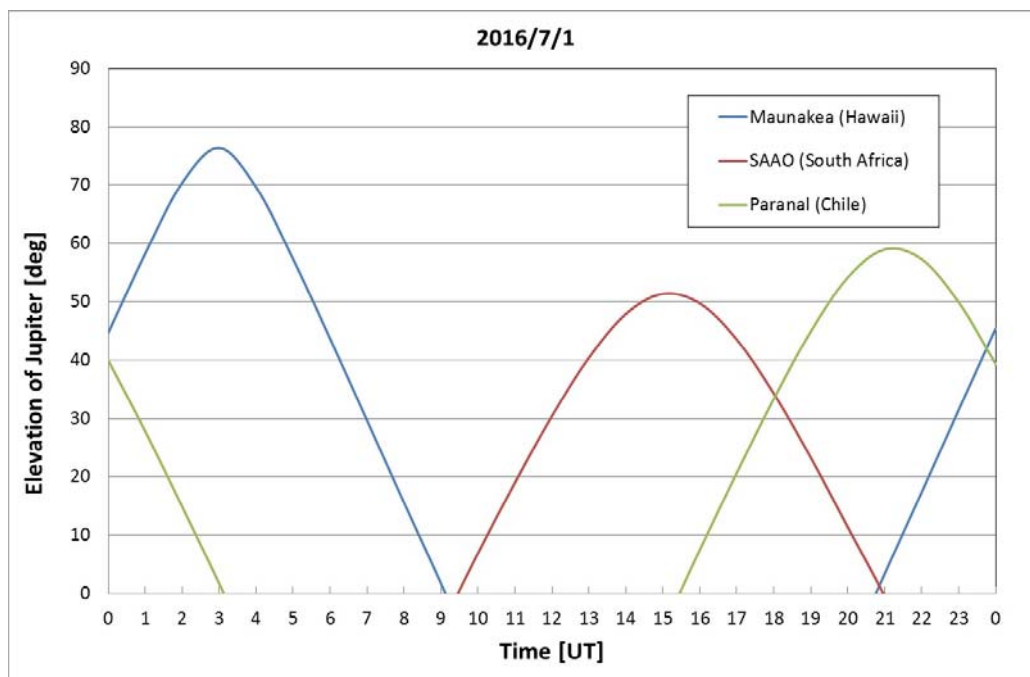


図1. ハワイ、チリ、南アフリカで観測した場合の木星高度変化。

ーイングによって像は劣化する。

以上の考察から、地上でのシーイングは1”を切る場合があるが、平均的にはFUJIN-2が実現しようとしている空間解像度の倍以上悪い値である。FUJIN-2と同口径の望遠鏡を用いた地上観測では、FUJIN-2で提案している空間スケールでの大気波動のスペクトル解析や、風速導出はできないと判断される。

また、FUJINの最終的な目標はメートルクラスの望遠鏡をスーパープレッシャー気球により半恒久的に成層圏に浮かべ、惑星の連続観測をすることによって惑星大気・プラズマ現象の科学に資することである。口径が数メートルの望遠鏡は、ロケットのフェアリングの制約で人工衛星スペーステレスコープとしては実現が困難であり、地上ではシーイングの影響のため本来備えている空間解像度を発揮することができない。その点、気球というプラットフォームは両者の欠点を補えるメリットを持っている。しかし、いきなりメートルクラスの望遠鏡を気球に搭載するには技術的リスクが大きすぎ、また科研費で機器を開発できる予算規模を大きく上回る。そこで、我々は口径400 mmの望遠鏡から始めることにした。小口径望遠鏡からのスタートであるが、FUJINの最終目標へ向けた第一歩である。

#### 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.