

極周回成層圏望遠鏡 FUJIN

田口 真・白藤祐稀子(立教大学理学部)

荘司泰弘(大阪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)、
高橋幸弘・今井正堯(北海道大学大学院理学研究院)

人類にとって根源的な問いである自分達はどこからやってきたのかという問題に、近年新たな展開が見られている。一つは太陽系内の惑星の衛星に地球外生命が発見される可能性が高まってきたことである。従来は、火星が最も地球の環境に似ているので、地球外に生命が見つかるとしたら火星だろうと考えられていた。しかし、巨大惑星の衛星に生命を宿す可能性がある環境が次々と見つかっている。もう一つは観測技術の向上によって、地球に似た系外惑星が見つかり始めたことである。現在はトランジット法で見つけやすい M 型星を周回する惑星が中心であるが、やがて太陽と似た恒星の回りに地球と似た惑星が見つかるのも時間の問題であろう。

しかし、我々は太陽系内の惑星に関して果たしてどこまで理解しているであろうか。一例をあげると、金星は分厚い硫酸の雲に全球が覆われており、外から可視光領域で観測すると雲頂からの一様な散乱光が見える。しかし、波長 365 nm の紫外光付近で観測すると濃淡模様が見えてくる(図 1)。この濃淡は雲頂よりも上にある吸収物質の密度の大小を反映していると考えられているが、この現象の発見から数十年を経た現在でも吸収物質は同定されていない。この濃淡の時間変動を追いかけることで、金星大気が 4 地球日程度で西向きに一周していることが発見された。この西向きの風は赤道上空で 100 m/s にも達するが、その生成維持機構は金星大気最大の謎となっている。これらはほんの一例であるが、その他にも水星のナトリウム大気、金星の大気重力波や雷放電、火星の極冠の消長、ダストストーム、大気メタンの変動、木星のオーロラや大気ダイナミクス等、未解明の惑星面変動現象は枚挙にいとまがない。究極の目標である生命の起源を解明するには、まず我々は太陽系内の天体の地表面や大気中での熱環境や物質循環を理解する必要がある。

地球に関しては気象、地震、電離層、地磁気、オーロラ等常時監視するシステムが構築されており、研究者はそれらの物理量に何らかの外的要因による変動が起こったとき、過去に遡って関連する観測データをアーカイブから探し出して、研究に利用することができる。しかし、惑星に関しては、可視光領域でさえも常時監視システムは構築されておらず、観測はキャンペーン的な期間限定観測に限られている。ところが、既存のシステムによって惑星の常時観測を実現しようとする、以下に上げる大きな問題がある。

一つ目は大気の透過率の問題である。地上望遠鏡は大気中の分子やエアロゾルによる吸収・散乱を受ける。特に 320 nm よりも短波長側はオゾン及び酸素原子による強い吸収を受けるため、これらの波長帯域での天体の地上観測は不可能である。また赤外領域は対流圏に集中する水、炭酸ガ

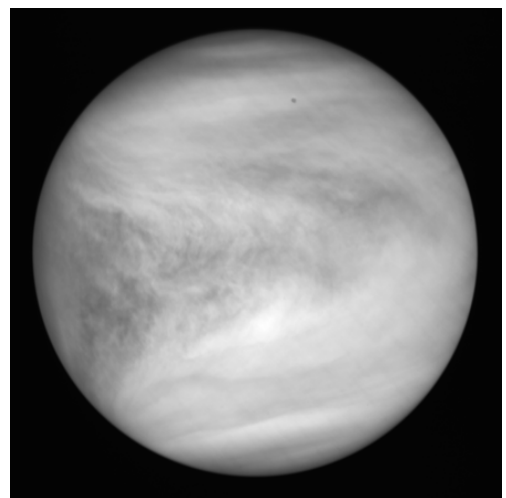


図 1. 2016 年 5 月 6 日に「あかつき」搭載 UVI が波長 365 nm で捉えた金星画像。

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、波長 $1\ \mu\text{m}$ ~ $15\ \mu\text{m}$ のスペクトル領域のうちおよそ $1/3$ ~ $1/2$ は地上では観測不可能である。

二つ目は大気のシーイングである。大気密度の揺らぎによって星像が理想的な像からぼやけたり揺らいだりすることをシーイングと呼ぶ。世界中でシーイングが良いとされるハワイ、チリ、南アフリカの観測地点でも最良のシーイングは $0.7''$ 程度であり、実用的には $1''$ 程度が目安になる。先に例としてあげた金星大気の流れベクトル分布を導出するには金星雲頂で数百 km の水平スケールの濃淡を分解できる必要がある。地球上から観測する場合、そのためには金星地球間の平均距離において $0.3''$ 程度の角度分解能が要求される。

三つ目は連続して観測できる時間の問題である。惑星の地上観測の場合、低緯度にある観測地点では惑星視高度が高くなるため、シーイングや透過率の観点から有利である。しかし、1 観測地点で 1 つの惑星を連続して観測できる時間は 8 時間程度が限度である。したがって、同じ惑星を 24 時間以上連続して観測しようとする、少なくとも経度で 120° 隔てた 3 カ所の観測地点が必要である。一方、大型望遠鏡を占有できる時間は通常の研究課題に関する観測提案に対して数夜程度である。例えば、2017 年 1 月に「すばる」望遠鏡で金星観測を行った際の観測日数は 4 日間、1 日あたりの観測時間は約 2 時間足らずであった。したがって、メータークラスの望遠鏡を惑星観測に長期間占有しようとする、専用の望遠鏡を建設する必要がある。しかし、メータークラスの望遠鏡の空間解像度を生かせるシーイングが期待できる場所は限られる。さらに、連続観測のためには、全ての観測地点において快晴でシーイングが良好でなければならないという条件が課せられる。短期間のキャンペーン的な惑星観測を地上望遠鏡ネットワークで実施することは実現可能かも知れない。しかし、それには大がかりな国際的組織と人的リソースの投入が要求される。

一方、衛星望遠鏡は大気の吸収・散乱やシーイングの影響を受けない。低高度衛星の場合、約 90 分周期で一つの天体を観測可能である。衛星望遠鏡は地上望遠鏡と比較してそのような優れた点があるが、利用可能な最大口径がロケットフェアリングで制限を受けると高い製造コストが問題である。

図 2 に各種望遠鏡の製造コストの比較を示す。地上望遠鏡の建設コストはメータークラスで 1 億円オーダーから「すばる」はおよそ 400 億円である。地上望遠鏡は、維持費が必要ではあるが、半永久的に運用が可能である。一方、打ち上げや運用経費を除いて、望遠鏡衛星の開発コストは、大きさや機能によって、100 億円オーダー（ひさき）からおよそ 2200 億円（Hubble、ただしサービスミッションの費用は除く）まで幅広い。しかし衛星には設計寿命があり、修理や検出器のアップグレードは基本的に不可能である。また、航空機搭載赤外望遠鏡「SOFIA」の製造コストはおよそ 1100 億円、年間維持経費がおよそ 94 億円と言われている。

現在、我々が開発を推進している極周回成層圏望遠鏡（風神、FUJIN-2）は上記地上望遠鏡及び衛星望遠鏡の欠点を克服し、太陽系内天体の常時監視を実現するのに最適なシステムであると我々は考えている。FUJIN-2 のコンセプト図を図 3 に示す。

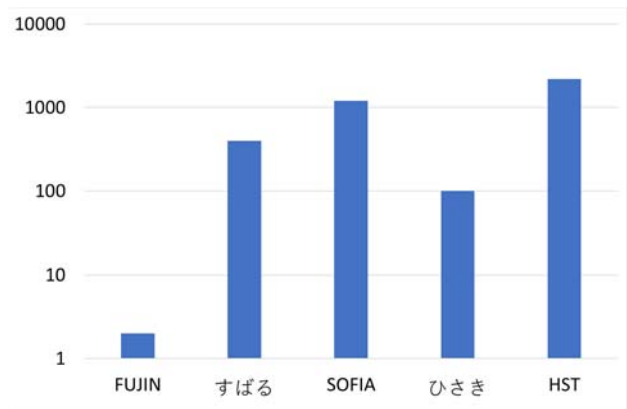


図 2. 各種望遠鏡の製造コストの比較（単位：億円）。

FUJIN については 1 回の実験コスト。

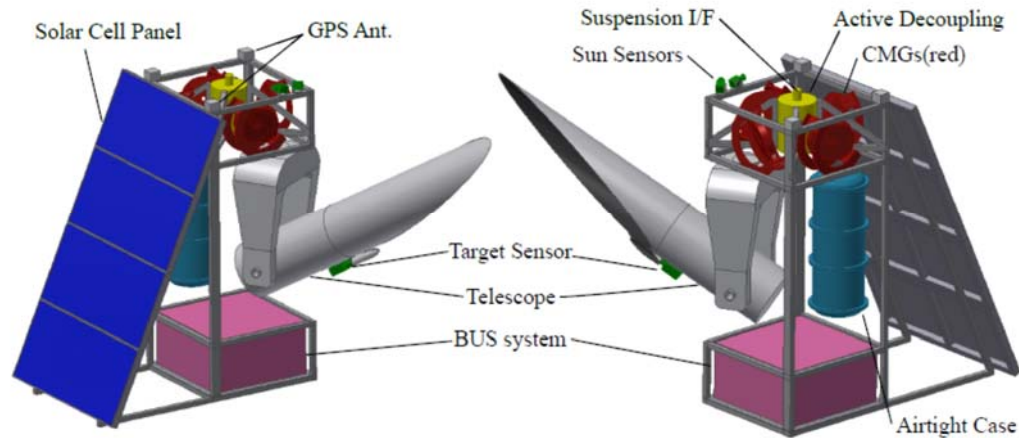


図3. 気球搭載望遠鏡システム FUJIN-2 コンセプト図。

FUJIN-2 ゴンドラは気球によって高度約 32 km に浮遊する。サンセンサー及びスターセンサーにより絶対空間に対してゴンドラの姿勢を安定化し、望遠鏡の架台を動かして目標天体を望遠鏡視野に導入する。架台による目標天体追尾エラーは鏡筒内に設置した第 3 鏡を傾けてリアルタイムに補正する。その他の主な装置として、電源系、制御エレクトロニクス、データ記録装置、通信装置、保安装置を備え、2 週間以上の長期連続観測が可能である。

FUJIN-2 の独自性・独創性を以下にあげる。

- ・ 広い観測波長領域

対流圏に多く存在する水、炭酸ガス、メタン等の赤外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る。その結果、波長 290 nm～15 μm の全帯域での観測が可能になる。

- ・ 高シーイング

高度 32 km 以上の成層圏では大気密度が地上の 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。例えば、地上でのシーイングが 1" の場合、高度 32 km でのシーイングは 0.06" となる。口径わずか 400 mm の小望遠鏡でも回折で決まる理論的限界の角度分解能を出せる光学系を用いれば、波長 500 nm で角度分解能 0.3" が実現できる。

- ・ 長時間連続観測

一般に、観測地点の余緯度 (90°-緯度) に等しい赤緯よりも高緯度にある天体は日周運動によって地平線下に沈むことがない。惑星はほぼ赤緯±25°以内の位置にあるので、緯度が高い極域 (理想は極点) では 24 時間以上にわたって連続的に観測可能な時期が存在する。したがって、地上の高緯度の 1 カ所または 2 カ所の観測地点で惑星の 24 時間以上の連続観測が可能である。しかし、高緯度では逆に惑星の視高度が低いため、地上観測ではシーイングや透過率の観点から観測に全く適さない。一方で、FUJIN-2 は惑星を 24 時間以上連続的に観測可能であり、しかも、視高度が低くてもシーイングの劣化はほとんどない。さらに、風の条件が適する時期を選べば、望遠鏡を成層圏の極周回風に乗せてほぼ等緯度を地球一周させて放球地点まで戻すことも可能である (図 4)。また、将来的にスーパープレッシャー気球の技術が確立すれば、推進力を備えたゴンドラを極渦中心まで移動させて滞留させ、数ヶ月から 1 年の期間にわたって惑星を定点観測し、調整・メンテナンスのために放球地点まで戻すというような運用も考えられる。

- ・ 昼間観測可能

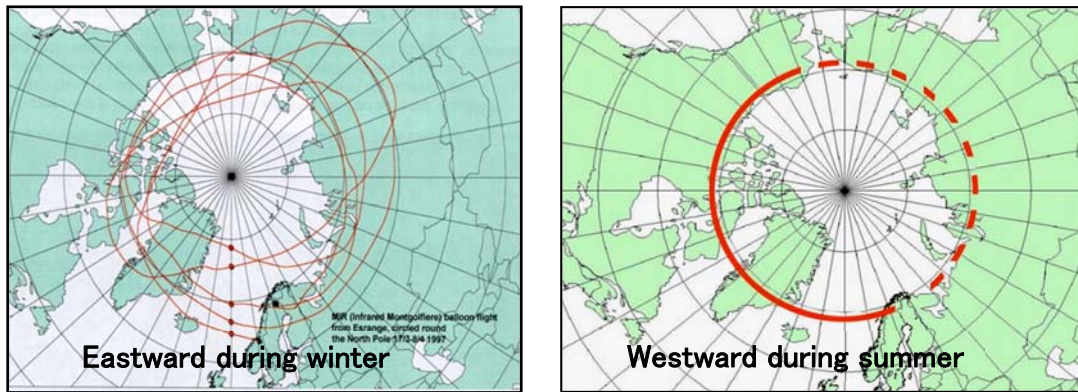


図 4. 極周回成層圏望遠鏡の予想航跡。

レーラー散乱やエアロゾルによる吸収・散乱もほとんど無視できる値となり、昼夜を問わず観測可能である。

- ・ 多目的性及び機動性

FUJIN-2 を極域成層圏に常駐させることで、惑星を常時モニタリングしつつ観測提案を受けて多数の天体を観測することが可能である。

- ・ 低コスト

口径 400 mm の望遠鏡を搭載する FUJIN-2 は、機器開発費が約 3000 万円、1 回の気球実験経費が約 1.5 億円 (1~2 日間フライト) から約 2 億円 (極周回フライト、2 週間程度) である。図 2 を見れば、複数回のフライトを実施したとしても、FUJIN-2 が他の手段と比較して桁違いに低コストであることが明らかである。

一方で、FUJIN-2 のデメリットもあげておかなければフェアではない。デメリットとしては、放球時期と場所を自由に選択できないことが大きい。地上望遠鏡や衛星望遠鏡と比較して大きな外乱が入力されるゴンドラ上で、高精度の天体指向・追尾性能技術が要求される。望遠鏡が大型化するほど、総重量に対する望遠鏡重量の比率が高まる傾向があるので、望遠鏡の動作の反動によるゴンドラ姿勢の乱れを制御する技術が必要になる。これらについては基礎開発を進めてきており、2019 年度に検証実験を実施する計画である。また、衛星望遠鏡と同様に、地上へ降ろせるデータレートの制約もあるが、様々な工夫により克服可能である。

すでに、これまでに交付を受けた科研費等を用いて、FUJIN-2 の姿勢制御及び目標天体の捕捉・追尾方式は設計されている。FUJIN-2 の根幹をなす望遠鏡、電源系、姿勢制御機構、気密容器などの物品は入手済みで、ハードウェアとして完成の道筋はできている。ただし、FUJIN-1 で採用されていた鉛直軸周りの一軸姿勢制御から、FUJIN-2 で進化した三軸姿勢制御に関しては、実験による検証が必要である。更新された FUJIN-2 計画では 2019 年度に姿勢制御及び目標天体捕捉・追尾の性能を検証する実験を国内で実施する。2021 年度にスウェーデン・キルナにある ESRANGE において FUJIN-2 実験を実施する。2021 年夏季は水星、金星、火星、木星が観測対象となる。1 日~2 日の長時間フライトによってこれらの惑星を順繰りに観測し、回折限界の空間解像度 $0.3''$ (波長 500 nm) で波長範囲 290 nm~15 μm においてそれぞれの惑星における変動現象を連続的にモニタリングする。2022 年度は前年度に気球実験ができなかった場合のバックアップ期間とする。