

投稿

金星の地上観測

～大型望遠鏡で覗く金星の世界～

大月祥子(宇宙科学研究開発機構)、佐川英夫(ドイツ・マックスプランク研究所)、
三津山和朗(東京大学)

1. はじめに

2009年5月現在、金星は明けの明星として日の出前の東の空に明るく輝いている。たとえ東京のど真ん中であっても、早起きさえできれば誰にでも見つけることのできる天体だ。それは古代の人にとっても同じであったようで、明るく美しく輝くこの星には美の女神 Venus の名が付けられている。古代から現代までの間には、科学者だけでなく数えきれないほど多くの人々が自分の目や望遠鏡で金星を見てきたことだろう。金星大気の最も大きな謎「自転速度の60倍の風(スーパーローテーション)」の存在を最初に発見したのは、なんと1950年代のフランスのアマチュア天文家であったという。1960年代からは各国が打ち上げた衛星による金星探査が始まったが、地上からの金星観測も世界中で行われており、数多くの結果が出ている。私たちの研究グループでも金星探査機 PLANET-C/Venus Climate Orbiter(VCO)の開発と並行して、10年前の1999年から地上大型望遠鏡を用いた赤外線観測を推進してきた。本記事ではこれまで私たちが行ってきた地上観測について紹介する。

2. 赤外線による観測

金星大気は二酸化炭素を主成分とし、地表付近で460°C90気圧にまで達する高温高压の下層大気(地表～高度50km)、全球を覆う濃硫酸の雲が存在する領域(高度50～70km)、光化学反応が活発な中間圏(高度70km～100km)および熱圏(高度100km付近～)から

なる。また、金星大気は自転速度の60倍にも達する速度で定常的な西向き循環をしていることが知られており、この現象はスーパーローテーション(超回転)と呼ばれている。このような地球大気とは大きく異なる金星大気の力学を理解するためには、地表から雲層にかけての下層大気環境を正確に把握することが不可欠である。しかし、可視光領域の観測では分厚い雲に阻まれ、雲の下の世界を見ることができなかった。そのため、下層大気の情報には投下プローブからの局地的・瞬間的な観測に限られていた。

この状況を大きく変えたのが赤外線観測技術の発達と、1983年に発見された「大気の窓」と呼ばれる雲層下の大気を見渡せる波長域の存在である[1]。その後の詳細な観測から、現在では波長1.01 μm 、1.10 μm 、1.18 μm 、1.27 μm 、1.31 μm 、1.74 μm 、2.3 μm に金星大気の透過帯(窓)が存在することが知られている。このような波長域では熱い下層大気からの熱放射が金星大気圏外にまで届き、さらにはこれら金星大気の「窓」領域が地球大気の「窓」領域に包含されていることから、地上望遠鏡を用いた全球的な観測を行なうことが可能である。1990年代以降、近赤外域を中心とした赤外線による地上からの金星観測が活発に行われている。私たちの研究グループではこれまで、下層大気からの熱放射、太陽光の雲層での反射光、雲頂付近から熱放射される中間赤外線、上層大気中での大気分子の発光現象である大気光などの分光撮像観測を実施した。そしてその観測データから、一酸

化炭素・塩化水素など大気微量成分の分布[2][3]、雲頂高度の空間変動[4]、上層大気中の温度分布[5]など世界的にも新しい結果を得てきた。

2.1 地上観測のチャンスと難しさ

金星の会合周期は約1年7カ月である。地球から見える金星の大きさもこの周期に従って大きく変わり、内合時の視直径は60秒角にも及ぶ。金星が太陽の向こうにある時は地球側からは金星の昼面(太陽の光が当たる側)しか見えないため、内合を挟む約5ヶ月間は金星の夜半球を観測する絶好の機会となる。私たちが観測を実施したのもこのような観測好機で、1999年秋、2002年冬、2004年春夏、2005-2006年冬、2007年夏の5期にわたって観測を実施してきた。

しかし、「宵の明星」「明けの明星」という名前が付けられている通り、内惑星で太陽近くに位置する金星は、日没直後(または日出直前)の1~2時間しか観測することができない。しかもその高度は低く、地球大気の揺らぎ等の影響を受けやすいという問題もある。1999年~2004年の観測は国立天文台岡山天体物理観測所や群馬県立ぐんま天文台など国内の天文台の望遠鏡を使用していたが、このような時間的・気象的条件は意外に厳しく、梅雨などの気象条件の悪い時期に当たると1か月近く天文台に通って取れたデータがたった数セットということもあった。

そこで、より良い条件下での観測を求めて、2005年からはハワイ・マウナケア山頂での観測を実施した。標高4200mのマウナケアの山頂は雲よりも高く、晴天率が非常に良い。また、大気の揺らぎが少ないため、空間スケールのより小さな現象まで見ることが可能になった。図1は(a)岡山天体物理観測所で観測した金星、(b)ハワイ・マウナケアのNASA赤外線望遠鏡施設で観測した金星(近赤外

2.3 μm)の比較である。(a)は2.28 μm 狭帯域フィルターで撮像したもので、ディスク左半分の昼面は雲層によって散乱した明るい太陽光を観測しているのに対し、右半分の夜面は熱い下層大気を光源とする熱放射を観測している。夜面に見える明暗の様子は、光っている層よりも上方の雲層を影絵のように映し出しており、「中緯度で雲が薄く、赤道域で厚い」という緯度分布を示している。(b)も同様に2.3 μm 窓波長での撮像画像であるが、観測時期が異なっており、ディスクの左側が夜面である。昼面部分は検出器の測定可能範囲を大幅に上回る明るさであったために、正しい数値が出力されず黒く抜けたような状態になっている。(a)と(b)の比較では、(b)の方が細かな構造まで見えており、空間分解能が高いことがわかる。

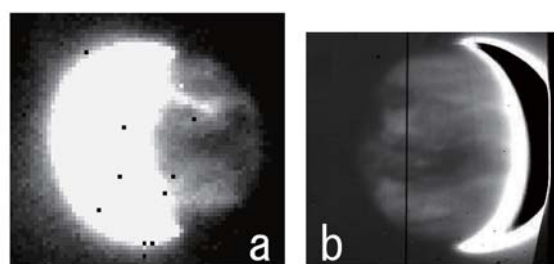


図1 2.3 μm 窓域での金星画像

(a) 国立天文台岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡搭載赤外分光撮像装置 SuperOASIS を使用し 2002/12/5 に取得した。(b) NASA 赤外線望遠鏡施設 3m 望遠鏡搭載赤外分光撮像装置 SpeX を使用し 2005/12/16 に取得した。

2.2 地上観測の利点

地上観測と比較したとき、探査機がもつ最大のメリットはやはり空間分解能にある。特に PLANET-C は地球周回の気象観測衛星と同様に、至近距離から時間的に連続した情報を高い空間分解能で得る計画であり、これにより各高度における雲の運動のモニター観測

から金星大気のダイナミクスを明らかにすることが可能である。マウナケア山頂で得られる画像は地球上では最高レベルの空間分解能を持つが、地球大気の外へ出て金星の至近距離から撮る探査機が相手の場合は分が悪い。

しかし、地上観測においては、高波長分解能の分光器など探査機への搭載が難しい大型の装置を用いて観測することが可能である。金星からの光を分光し、得られたスペクトルを解析することで、大気に関する化学的情報や温度情報などが導出できる。さらに、私たちの観測ではスリットを金星ディスク上で移動させ、連続的にスペクトルを取得した。この手法により、「波長方向 1 次元 + 空間方向 2 次元」の 3 次元データキューブを得ることができ、化学的情報や温度などの全球分布に関する議論が可能になった。

PLANET-C は分光器を搭載しないため、化学的情報に関しては非常に限られたものしか得ることができない。また、過去のガリレオ探査機や現在金星軌道周回中の欧州のビーナスエクスプレス探査機は分光観測を主眼としたものであるが、前者は金星フライバイという非常に限られた時間の観測にとどまり、後者は近接軌道からの探査機直下点のピンポイント観測となる為、いずれの観測でも全球的な分光情報を取得出来ない。これに対して地上観測は空間分解能という点において劣ってはいるものの、金星全面の高精度な分光情報を得ることができる。したがって、探査機との共同観測においては互いに相補的な役割を担う。

3. 地上観測による科学的成果

当初、私たち日本の金星地上観測者グループは PLANET-C との共同観測に向けた観測体制および解析手法の確立という位置づけで観測・解析を行っていたが、研究を続ける

に従って様々な結果が得ることができた。この章ではその一部を紹介する。

3.1 下層大気中の一酸化炭素分布

2.3 μm の金星大気の「窓」では一酸化炭素 (CO) を始めとする金星大気中微量成分の分子吸収線が観測可能である。ガリレオ探査機はこの分子吸収線を利用し金星下層大気における CO ガスの空間分布観測を行い、緯度が高くなるにつれて下層大気中の CO 混合比が増加するという結果を得た。金星の CO ガスは雲より上層に生成源を持つと考えられているが、生成源の無い下層大気中においてもその空間分布に差が生じていることは、上層大気から下層大気の高緯度地域へと雲層を挟んで CO ガスを輸送していく大気循環の存在を予見させるものである。しかしガリレオ探査機のデータはフライバイ時の一度だけのものであり、その後は CO ガスの空間分布に関して結論を与えるような観測は行なわれていなかった。そこで「はたしてこの様な CO ガスの空間分布は地上観測でも把握できるのか?」「金星の分厚い雲層を縦断する様な大規模な大気循環構造は実在しているのか?」ということを主題として、2002 年に国立天文台岡山天体物理観測所、2004 年に群馬県立ぐんま天文台にて観測を実施した。

2 μm 域における金星夜面スペクトルを、放射伝達モデルや金星大気モデル、分子線スペクトルデータベースを用いて計算し、観測によって得られた夜面スペクトルを再現するような CO 混合比の条件を求めた。結果、ガリレオ探査機の観測結果と同様に赤道域で CO 混合比が少ないという傾向を示すことがわかった[2]。現在ではさらに、CO が生成される上層大気中での分布や輸送を導出するために、同じ赤外 2.3 μm 域での太陽光の雲層反射光の観測やミリ波波長帯での CO 分子吸収線観

測[6]も行なわれている。

3.2 雲頂の微細構造

太陽からの入射エネルギーの大部分は金星を隈なく覆う雲により惑星大気の外へ反射され、雲より下層の大気からの熱放射も広い波長域にわたり光学的に分厚い雲に吸収される。このように金星大気熱収支において、雲の及ぼす影響は大きい。金星気象現象を理解するためには、雲がどのように分布し、どのような力学的振る舞いをするかを観測的に示すことが重要となる。そこで、2005年国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡を用いて、雲頂付近から熱放射される中間赤外線を観測し、金星雲頂における数100kmスケールの微細構造を世界で初めて検出した[4]。微細構造の正体を明らかにするため、2007年には再びすばる望遠鏡を用いて観測が行なわれた。現在は、様々な高度での構造や鉛直温度勾配を導出すべく分光データの解析が進められている。

3.3 上層大気中の酸素分子大気光

上層大気は密度が小さく、投下プローブでの直接観測も困難であったことから、観測的な情報が少ない領域である。そのため、大気分子の発光現象である「大気光」はこの高度域の重要な情報源となる。1.27 μm で光る酸素分子の大気光は非常に明るく、1979年の発見以来地上観測が重ねられてきた。私たちのグループでも2002年に岡山天体物理観測所、2004年にぐんま天文台、2005、2006、2007年にNASA赤外線望遠鏡施設にて観測を続けている。2002年の観測では、スペクトルの解析から夜半球温度分布を導出し、発光層高度において高温領域が存在することを発見した[5]。また2007年の観測では大気光発光強度と温度の変動をモニタリングし、上層大気中の大気波動や大気循環についての考察を進めている。

4. おわりに

金星に飛んで行く探査機に私たちが乗ることは出来ない。しかし、地上からも望遠鏡を通じて、探査機と同じように金星の世界を覗き見ることができる。時には探査機からすら見えない世界を知ることもできる。PLANET-C探査機が伝えるであろう金星至近からの感動とともに、地上望遠鏡からの未知なる世界の報告にもぜひご期待ください。

文 献

- [1] Allen, D., Crawford, J. (1984) 'Cloud Structure on the dark side of Venus', *Nature* **307**, pp.222-224.
- [2] 大月祥子ら (2005) 「金星大気近赤外線分光撮像観測」, *天文月報*, vol.98, no.1, pp.28-36.
- [3] Iwagami, N. et al. (2008) 'Hemispheric distributions of HCl above and below the Venus', *P&SS* **56**, pp.1424-1434.
- [4] 三津山和朗 (2007) 「中間赤外線観測による金星雲頂/二酸化硫黄の空間変動の研究」, 修士論文, 東京大学
- [5] Ohtsuki, S. et al. (2005) 'Ground-based observation of the Venus 1.27 μm O₂ airglow', *ASR* **36**(11), pp.2038-2042.
- [6] 佐川英夫 (2007) 'Observational study of the Venusian atmosphere with Nobeyama millimeter array', 博士論文, 東京大学