一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その19 ~ IR1+IR2による金星測光データから探る雲層構造~ 佐藤 毅彦¹、大月 祥子²、岩上 直幹³、上野 宗孝¹、上水 和典¹、 鈴木 睦¹、はしもと じょーじ⁴、坂野井 健⁵、笠羽 康正⁵、中村 良介⁶、 今村 剛¹、中村 正人¹、福原 哲哉⁷、山崎 敦¹、山田 学¹

(要旨) 金星探査機「あかつき」搭載4カメラにより実施した2011年2~3月の金星測光キャンペーン観測から, IR1, IR2の観測データを解析した.金星輝度の位相曲線は過去に発表されているもの(標準雲モデルで再現 できる)と異なり,位相角20度以下で輝度が著しく増している(IR1).これらを解析し雲層構造を決定した ところ,高空のヘイズ微粒子が減少するとともに中サイズ~大サイズ粒子の密度も増し,それが位相曲線変 化の原因であることが分かった.金星雲のこのような変化の原因は不明であるが,大気中SO2濃度のトレン ド(長期減少傾向ののち,近年,元に戻った)と関係している可能性がある.

1. 小位相角観測の意義

対象物から見て,観測者と光源(太陽)のなす角を位 相角と呼ぶ.位相角が0°ということは,観測者と太陽 が同方向にあることを意味する.対象物が金星,観測 者が地球ならば,これは地球~太陽~金星の順に並ん だときに起き,地球から見て「金星の外合」に相当する. 当然のことながらその際の金星は太陽にごく近く,強 烈な太陽光のため精密な金星測光は行いにくい.

一方,金星周回軌道投入(VOI-1,2010年12月)に失 敗した金星探査機「あかつき」[1]は、2011年3月に金 星より太陽に近い位置を通り抜け、その経路で位相角 0°の金星を観測するチャンスが発生した[2].そのとき の並びは、太陽~あかつき~金星であり、太陽光に妨 げられない金星測光が可能である。このチャンスを活 かして、金星測光キャンペーン観測が計画された[2].

小位相角において天体の輝度が得意な振舞いを見せる、いわゆる opposition effectは、大気をもたない天

- 4. 岡山大学 5. 東北大学
- 6. 産業総合研究所
- 7. 北海道大学

体においてよく知られ[3], 位相角0°に向かい急速に 明るさが増すことから, opposition surgeとも呼ばれる. 有名な「イトカワに写ったはやぶさの影」の画像にお いて, 探査機の影の近傍だけ小惑星表面が明るく見え ているのは, まさにこの効果を示しているのである [4].

一方,分厚い大気をもつ惑星においては,このよう な強いopposition effectは見られないと通常は考えら れている.さまざまなサイズの雲粒子による多重散乱 を受ける過程で,特徴が薄められてしまうからである. しかし,登山のときや,飛行機で旅をする際に,ブロ ッケン現象を見ることがある.これは,サイズのよく そろった水滴が位相角0°付近の輝度に特徴的な波打ち を示すことにより起きる[5].虹のように色づくのは, そのピーク位置が波長によって異なるからである.

このように、分厚い大気や雲に被われた惑星であっ ても、小位相角の輝度変化が情報をもたらす場合があ る.「あかつき」4カメラによる金星測光観測もそう した発見を期待しつつ、計画され行われた[2].本稿 では、IR1、IR2のデータを解析して得られた結果を 報告する.

^{1.} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

^{2.} 専修大学

^{3.} 東京大学

satoh@stp.isas.jaxa.jp



図1:小位相角における金星位相曲線. IR1(○), IR2(◇)ととも に, Mallama et al. (2006)によるIバンドデータ(+)もプロッ トしている.

2. 観測データ

IR1, IR2は「双子のカメラ」であり, その観測波長 域はちょうど1オクターブ異なる.加えて, 金星の輝 面を観測する波長がIR1の場合は吸収の少ない連続光 (波長0.90 μm), IR2の場合はCO₂吸収波長(2.02 μ m)という違いもある[6.7].

これら二つの観測データを組み合わせることで, 雲 粒子のサイズのみならず, その大気中の鉛直分布まで 推定することが可能である.両カメラが稼働した観測 期間は, 2011年2月28日から3月25日までである. それ以外の期間は, IR2検出器を適切な低温(70K以 下が必要)に保つことができず,両カメラのデータを 組み合わせた解析はできない.この観測期間にカバー できた位相角範囲は, 0°~56°であった.

IR1, IR2の画素スケールは0.012°/画素である(検 出器画素はどちらのカメラも一辺17 µmの正方形). 観測期間中の金星までの距離は最短でも1,300万km あまり,金星視直径は0.055°どまりである[2].したが って,検出器上での金星像は直径がせいぜい4.5画素 であるから,輝度分布ではなくディスク全体の積分輝 度を測定した.日々変わる太陽〜金星距離,探査機〜 金星距離を補正し,いずれも1天文単位に換算した「太 陽系天体に対する絶対光度」を位相角の関数として求



図2:金星の標準的な雲モデル.

めた. その上で, 位相角0°の絶対光度を幾何アルベド に変換する係数を乗じて得られたプロットが図1であ る.

図1には、IR1(波長 0.90 μ m), IR2(2.02 μ m)の測定 データ、そして Mallama et al. [8]が報告している Iバ ンド(波長 0.90 μ m)のデータをプロットしている.比 較してみると、IR1データと Mallamaet al.のIバンド・ データはほぼ同波長であるのに、大きな違いが明らか である.つまり、位相角 30°~50°付近のスロープは良 く一致している.しかし、小さな位相角ではIR1デー タが著しく明るく、20°付近に「肩」のような特徴を見 せている.このことから、「あかつき」観測時の金星 雲層構造は、過去のそれとは異なっていたと考えられ る.

3. 放射伝達モデルによる解析

3.1 標準雲モデル

波長0.90 µmでは大気, 雲粒子ともにほとんど吸収 をしないから, 金星輝度は「雲粒子がどのように成層 しているか」で決まってしまう(雲高度を決定するこ とはできない). 標準雲モデルとしてEsposito et al.[9] を参照(図2)し, 計算はadding-doubling法により行っ た. 位相角毎にそれに相当する擬似金星ディスクを用 意し, 各画素ごとに散乱幾何学を割り当てる. 各散乱 幾何学に対する反射光輝度値をモデル計算し, 得られ た擬似金星画像の全体の明るさの積分値を位相角の関 数(位相曲線)として表し, 観測データと比較する.



図3:標準雲モデルによる位相曲線とMallama et al. Iバンドデー タの比較.

図3に、標準モデルによる位相曲線と観測データと の比較を示す. Mallama et al.データは標準モデルに より良好に再現される. 逆に、IR1データを再現する ためには、何らかの変化を加える必要があることが分 かる.

そのヒントとして、図3に一つの例を示してある(灰 色の破線).標準モデルの最上層はサブミクロンの微 粒子(ヘイズ)であるが、その光学的厚さを1/10に減 らしてみたのである.すると、位相角20°付近に微か に「肩」のような構造が見え始めている.これは、標 準モデルにおいてはさまざまなサイズの粒子による多 重散乱でマスクされていた「金星のブロッケン現象」が、 最上層のヘイズを取り除くことで見やすくなったこと を示している.

3.2 IR1最適モデル

ブロッケン現象のカラー画像を見ると、リングの外 側は赤く内側は青い[5]. つまり、同じ粒子サイズを 考えたとき、位相曲線の「肩」は短い波長では小さな 位相角に、長い波長では大きな位相角にシフトする. 光散乱を支配するサイズパラメータは(粒子の周)/(波 長)により表される.したがって、波長を固定すれば、 小さな粒子では大きな位相角、大きな粒子では小さな 位相角に「肩」がシフトする.これらの関係を念頭に 置いてさまざまなパラメータ組合せを試し、次の知見



図4:最適モデルによるIR1位相曲線の再現.

を得た.

- ・サブミクロンのヘイズ粒子は少なくする必要がある (位相曲線の「肩」を生じる中サイズの粒子をより露 出しなければならない).
- ・IR1位相曲線の「肩」位置を再現するためには、中サイズ粒子はHansen and Hovenier[10]の1µm半径(モード2と呼ばれる)よりも少し大きい1.4µm半径(モード2)と呼ばれる[11])がより適している。
- ・モード2¹粒子は主雲層より上のヘイズ層にも少し分散している(光学的厚さ0.3程度).
- ・主雲層はモード2[']粒子:モード3^{*}粒子=4:6程度の比率で構成されている。

つまり,モード2²粒子によるブロッケン現象が位相角 20°付近の肩となり,モード3粒子が混合することに よって小さな位相角全体の持ち上がりが再現されるの である.IR1最適モデルと観測データとの比較を図4 に示す.

3.3 IR2最適モデル

IR1データの解析により, 雲粒子の「積み重なり方」 を決定できた.次に, IR2 2.02 µmデータ(CO₂吸収バ ンド)を用いて, 雲粒子の垂直分布を決定する.フィ ルターは波長2.02 µmを中心に, 0.04 µmの透過幅を もつ.このフィルター関数内でCO₂吸収係数を平均し, 金星大気構造と組み合わせ,「大気頂からの光学的深



図5:IR2観測波長における大気吸収曲線(高度と光学的深さの関係)を雲層の存在高度と対応させて示している.

さ」を得る(図5).大気頂から測って光学的深さが1と なる高度は約65 kmであり,第二層(Upper Cloud)の 途中に位置する.したがって,この層の上端の高度は 有意に求められるものの,下端は雲粒子の光学的厚さ が大きいこともあって,決定することはほとんどでき ない.

実際のモデル決定はユニークにできるわけではなく、 二つのパラメータ「第一層内のCO₂吸収量 τ_1 」「第二 層内のCO₂吸収量 τ_2 」が相補的に変化し、その組合せ が得られることになる(図6). ここでは、第二層にお ける τ_2 を標準、1/2、1/4と変えながら τ_1 の変化を調 べた、第二層の τ_2 が小さくなる、すなわち雲粒子が 濃密になると反射率が高まる.すると、それを打ち消 すように τ_1 による吸収を増す、つまり第二層の上端 高度を下げるわけである.モデル曲線のデータに対す るフィッティングはいずれも大差ないが、Venus Express データの解析から推定されている雲頂高度74 km(Ignatiev et al. [12])と整合性の高いものとして、 $\tau_1=0.09, \tau_2=1.4$ (標準)を採用することとした.こうし て決定された雲層構造は図5に標準モデルとの比較と して示されている.

3.4 雲層構造変化の原因

金星雲のこのような変化の原因は,現時点では不明 である.関連するかも知れない報告として,大気中



図6:最適モデルによるIR2位相曲線の再現.

SO₂濃度のトレンドがある. 1980年代以降の長期減少 傾向ののち,近年になって元のレベルに戻ったとされ ている[13]. SO₂は金星雲粒子の材料物質であるから, この「復活」と中サイズ粒子・大サイズ粒子の増大が 関係している可能性が考えられよう. 今後,分光観測, さらに粒子サイズに敏感な偏光観測データなどを継続 し,本観測のフォローアップを行うとともに,いつか また減少傾向に転じるのか,それが何にトリガーされ るのかを調べる必要がある.

4. まとめ

VOI-1の失敗による落胆の中,あかつきチームは少 しでも金星科学データを取得しようと,必死で金星測 光観測を実施した[2]. そこから得られたものは,当 初予想を上回る興味深い科学データであり,本稿で紹 介したように,十分に最新の金星科学に貢献するもの である.

金星到着までは、まだ長く険しい道のりが予想される[14]. しかしわれわれは、それを乗り越えて「あかつき」を金星に到着させ、そして重要な科学的知見を得ることを目指したい.

参考文献

- [1] 中村正人, 2011, 遊·星·人 20, 68.
- [2] 山田学 他, 2011, 遊·星·人 20, 222.
- [3] Hapke, B., 2012, Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy (2nd edition) (Cambridge University Press).
- [4] http://spaceinfo.jaxa.jp/hayabusa/photo/images/ itokawa17 large.jpg
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Brocken_spectre
- [6] Iwagami, N. et al., 2011, EPS 63, 487.
- [7] Satoh, T. et al., 2012, EPS (submitted).
- [8] Mallama, A. et al., 2006, Icarus 182, 10.
- [9] Esposito, L. W. et al., 1983, in Venus (The University of Arizona Press), 484.
- [10] Hansen, J. E. and Hovenier, J. W., 1974, J. Atmos. Sci. 31, 1137.
- [11] Grinspoon, D. et al., 1993, Planet. Space Sci. 41, 515.
- [12] Ignatiev, N. I. et al., 2009, JGR 114, E00B43, 1.
- [13] Na, C. et al., 1994, Icarus 112, 389.
- [14] 山田学, 廣瀬史子, 2012, 遊·星·人 21, 71.