# 「あかつき」中間赤外カメラによって観測された金星雲頂温度分布の特徴

田口 真(立教大理)、二口将彦(立教大理)、福原哲哉(北大理)、佐藤光輝(北大理)、今村 剛(宇宙研)、 中村正人(宇宙研)、上野宗孝(宇宙研)、鈴木 睦(宇宙研)、岩上直幹(東大理)、はしもとじょーじ(岡山大理)

#### 1. はじめに

金星探査機「あかつき」が無情な力学法則に従って金星から引き離されつつある2010年12月9、10日、中間 赤外カメラ(LIR) [Fukuhara et al., 2011]は金星撮像を行った。当初予定されていた周回軌道と比較すると遙か彼 方の距離からシャッターを切られた画像には、まるで望遠レンズを忘れて運動会に出向いたお父さんが撮った我 が子の写真のようにぽつんと小さく金星が映っていた。得られた画像のうちの貴重な1枚である32枚積算画像の 積算前画像を全てダウンロードしても、金星像のデータ量は高々20kB程度である。そこから搾り取るように、金星 雲頂高度領域の温度構造についての情報を抽出した。

## 2. 観測

撮像観測時の状況を表1にまとめた。9日に無積算画像及び32枚積算画像を各1回、10日に無積算画像 を1回の撮像観測を行った。9日、10日の撮像距離はそれぞれ60万km及び89万kmであった。あかつきは 金星のほぼ赤道面上、真夜中の方向にいた。32枚積算画像を取得するには約128秒の時間がかかる。あかつき は通常と異なる姿勢で撮像を行ったため、姿勢を安定させることができず、撮像中に視野方向が方位角及び高 度角方向にそれぞれ約3画素分ゆっくりとドリフトした。そこで、積算前画像の画素を10×10のサブピクセルに分 割し、金星中心が一致するように位置補正して重ね合わせた。そのようにして合成された32枚積算輝度温度分 布と、2枚の無積算輝度温度分布を図1に示す。視野方向の空間スキャンのおかげで、32枚積算画像は本来の 画素サイズで決まる空間解像度よりも若干高い解像度となった。

LIR によって得られた温度は低緯度での 243 K からポーラーカラーの 237 K まで変化している。 Zasova et al. [2007]の夜側子午面温度分布を適用できるとすると、これらの温度は低緯度で高度 63 km、 ポーラーカラーで 58 km に対応する。Zasova et al. [2007]は波数 1218 cm<sup>-1</sup>での雲の光学的深さを求め、 光学的深さが 1 となる高度を雲頂高度として子午面温度分布図にプロットした。これらの高度は低緯度 での 66 km から、極域での 60 km まで低下する。温度子午面分布が Venera 15 による観測時と変わってい ないと仮定すると、LIR による観測はより低い高度が見えていたと解釈される。電波掩蔽観測による温度高度分 布または Venus Express (VEX)/VIRTIS による特定高度における温度観測結果と比較することによって、 観測された温度差が温度分布の変動によるのか、雲の光学的深さ分布の変動によるのか区別できるであ

Date	Time [UT]	Distance [km]	М	Ν	Sub-spacecraft Point		Subsolar Point	
					Lon.	Lat.	Lon.	Lat.
Dec. 9, 2010	00:13:58-00:16:06	600,000	32	32	67.2°	1.4°	-84.1°	-1.8°
Dec. 9, 2010	00:40:11-00:40:14	605,000	1	1	67.3°	1.4°	-84.0°	$-1.8^{\circ}$
Dec. 10, 2010	02:00:11-02:00:14	886,000	1	1	68.2°	1.6°	$-80.8^{\circ}$	-1.9°

表 1. LIR 金星撮像観測

ろう。

全ての画像で金星ディスク中心から周辺へ向かうに従って輝度温度が下がるリムダークニング効果がはっきり とわかる。これについては後述する。

9日の2回の撮像結果を比較すると、温度分布はほとんど変化ないが、9日と10日の温度分布を比較すると、 赤道域付近で明らかに温度の低下が見られる。

その他に、両半球高緯度に存在するコールドカラーの低緯度側境界が東に向かうほど高緯度へ偏っている様 子や中低緯度の帯状構造とその中にあるさらに小さい構造が見られる。32 枚積算画像でも両極のポーラーダイ ポールは判然としないが、かすかにポーラーカラーよりも高温になっている領域が極域に存在するように見える。 過去の観測ではポーラーダイポールの長軸方向の境界は緯度 70°まで降りてきている。もし LIR 観測時にポー ラーダイポール長軸が LIR 視線方向を向いていたとしたら、ポーラーダイポールの高温領域がもっとはっきりと映 っていたであろう。両極ともにポーラーダイポール長軸は LIR 視線方向と直交する方向を向いていたのかもしれ ない。

3. 解析結果と考察

### ① リムダークニング

リムダークニング効果は LIR の視線方向の天頂角が大きいほど、同じ高さの光学的深さが深く見えることによる。リムダークニング効果が顕著に現れるのは、光学的に薄い雲が温度勾配が大きい高度領域に広く分布している場合である。逆にある高度から下で急激に雲の光学的厚さが大きくなっている場合には、どの方向から見ても 温度は一様に見える。このように、リムダークニング効果は雲分布と温度分布に依存する。そこで、観測されたリム ダークニングから雲の分布の情報を抽出した。

雲の高度分布をインバージョンによって求めるほどの情報は含まれていないので、雲高度分布を与えて、それ に乗じるファクターと分布全体を上下させる高度シフトの2つのパラメターをフィッティングによって求めた。雲分布 は Takagi and Iwagami [2011]のモード1及びモード2粒子分布、温度分布は Seiff et al. [1985]による温度モデル を利用した。モード1及びモード2粒子の分布を同時に独立して修正する(パラメターを4つとする)と解が一意に



図 1. LIR によって得られた金星雲頂高度温度分布[Taguchi et al., 2012]。 左から9日 32 枚積算画像、9日無積算画像、10日無積算画像。右下は撮像時の日照領域、 両極の方向、等緯度経度線(30°毎)を示す。



Lat [°]	Cloud Particle Mode	Optical Depth	Height [km]	
<30	1	13.4%	-2.5	
<30	2	305%	-8.0	
45	1	22.4%	-4.9	
45	2	105%	-6.7	

表 2. リムダークニングフィッティング結果

求まらない。したがって、モード1またはモード2粒子のどちらか一方を動かし、もう一方は固定した。緯度30°以下と45°帯の2つの領域に分けてフィッティングを行った。結果を表2に示す。

いずれのケースでも雲頂よりも上の光学的厚さを薄くする傾向である。緯度30°以下でモード2を動かしたケースでは光学的厚さを305%に増やしているが、高度を8.0kmも下げているので、ある高度での光学的厚 さは薄くなっている。この結果から、雲頂よりも上の靄層の光学的厚さが薄くなって、より低い高度が 見えているが、雲頂よりも下の雲分布はあまり変わっていないと解釈できる。

② 紫外画像との比較

リムダークニング補正を施した輝度温度分布(図 2)を VEX 搭載 Venus Monitoring Camera (VMC)によって得 られた紫外画像と比較した。VMC が観測している4波長のうち紫外域のコントラストが高い波長 365 nm の画像を 用いた。この波長では LIR よりもやや高度が高い 70 km 付近を見ていると考えられる。これまで紫外領域で金星 を撮像するとY 字を横倒しにしたような構造が見られることがわかっている。紫外領域で見られる構造は未知の紫 外吸収物質の分布を反映していると考えられている。昼間側紫外域で見られる構造が LIR による夜側輝度温度 分布とどのように対応するか調べた。これらの光で見える高度でのスーパーローテーションの周期が 4 日であるこ とを考慮して、LIR 撮像の約 2 日前、4 時間前、2 日後の VMC 画像を選んだ。VEX の軌道は遠金点が南極上空 に固定されているため、VMC 画像には主に南半球が映っている。図 3 に座標展開した VMC 画像を示す。4 時



図 2. 2010 年 12 月 9 日に LIR によって撮像された 32 枚積算金星画像にリムダークニング補正 を施した輝度温度分布。リムに近い領域(白いドーナツ状の領域)は背景宇宙空間からの 放射の混合を完全に除去できていない可能性があるので、データから除いた。右の図は図 1 と同様。



図 3. 中間赤外と紫外画像の昼夜比較。上から LIR による中間赤外画像取得の約 53 時間前の VMC による紫外画像、同 4 時間前の紫外画像と中間赤外画像、同 42 時間後の紫外画像。横軸は 0°が真 昼、90°が朝方を示す。

間前の紫外画像には中間赤外画像を重ねて表示してある。

紫外画像にはいくつかの帯状構造が見られ、時間的に変化している。緯度45°から60°には常に明るい帯状 の領域が見られる。一方、輝度温度分布には緯度45°を中心とする高温の帯状領域が見られる。紫外と赤 外で明るく見える緯度帯は若干ずれているが重なっている領域もある。しかも、両者は昼側と夜側とい う見ている半球の違いがある。しかし、もし紫外で昼側で明るく見られる構造が夜側まで保たれていて、 赤外で明るく見える領域と対応していると考えるならば、紫外吸収物質が少ない領域ではモード1 雲粒 子が赤外域で光学的に薄く低い高度まで見えていると考えられる。すなわち、未知の紫外吸収物質とモ ード1 雲粒子の間に何らかの関係があることを示唆している。また、紫外吸収物質の寿命は少なくとも2 日はあると考えられる。

#### ③ 測光観測との比較

2011 年 3 月にあかつきは金星をほぼ太陽方向から観測する位置にいた。距離が遠いため、金星視直径は LIR の 1 画素が張る角度とほぼ同じであった。数画素にまたがって落ちた金星からの赤外光強度を積分し、金 星昼面全面の平均的な輝度温度を求めた。観測された輝度温度の時間変化を図4に示す。この期間の平均輝 度温度は 225 K であった。この値は過去の観測結果に近い。一方、図2に示す 2010 年 12 月 9 日の金星輝度 温度の平均値はおよそ 240 K であった。これらの温度差は、昼夜の雲分布の違いが現れているとすると興味 深い。2011 年 3 月の観測は 1 画素程度の非常に小さい金星像から輝度温度を求めたので、見落としている誤 差要因があり、そのために低く見積もられている可能性がある。しかし、多少の誤差があるにしてもこの温度差は 有意であろう。2010 年 12 月の観測と 2011 年 3 月の観測の間に雲頂高度付近の温度に時間変化があったのか、 それとも昼夜間の温度差を反映しているのか判然としない。また、図4 には 2011 年 3 月 23~24 日にかけて低温 傾向が認められる。この時期はちょうどあかつきが金星から見て内合の位置を通過した時期に当たっている。こ れは実際に起こった自然変動を検出したと見るべきであろうが、この原因は LIR 観測データだけからは何 とも言えない。今後、他のカメラによる観測及び VEX 電波掩蔽観測結果と比較したい。



図 4. LIR による金星測光観測の結果。

4. 結論

あかつき搭載 LIR による 2010 年 12 月 9, 10 日の金星撮像観測及び 2011 年 3 月の金星測光観測データを 用いて、金星雲頂高度付近に見られる温度構造について考察した。過去の雲頂温度との比較、中低緯度の帯状 領域中に見られるパッチ上構造、ポーラーダイポールの位相、夜側靄層を構成する粒子の高度分布、紫外吸収 物質と靄層の分布の関連、昼夜の温度差に関して、興味深い情報を引き出すことができた。しかし、残念ながら データ量が十分ではないため、どれも確定的な結論を得ることはできない。次の金星周回軌道投入に成功し、よ り高い空間分解能で金星像を連続撮像することができれば、これらの問題に一定の解答を得ることができると期 待される。 参考文献

- Fukuhara, T., M. Taguchi, T. Imamura, M. Nakamura, M. Ueno, M. Suzuki, N. Iwagami, M. Sato, K. Mitsuyama, G. Hashimoto, R. Ohshima, T. Kouyama, H. Ando, and M. Futaguchi, 2011, LIR: Longwave Infrared Camera onboard the Venus Orbiter Akatsuki, *Earth Planets Space*, 63, 1009–1018, doi:10.5047/eps.2011.06.019.
- Seiff, A., et al., 1985, Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100km altitude, *Adv. Space Res.*, **5**(11), 3–58.
- Taguchi, M., T. Fukuhara, M. Futaguchi, M. Sato, T. Imamura, K. Mitsuyama, M. Nakamura, M. Ueno, M. Suzuki, N. Iwagami, and G. L. Hashimoto, 2012, Characteristic features in Venus' nightside cloud-top temperature obtained by Akatsuki/LIR, *Icarus*, in press, 10.1016/j.icarus.2012.01.024.
- Takagi, S. and N. Iwagami, 2011, Contrast sources for the infrared images taken by the Venus mission AKATSUKI, *Earth Planets Space*, **63**, 435–442.
- Zasova, L. V., N. Ignatiev, I. Khatuntsev, and V. Linkin, 2007, Structure of the Venus atmosphere, *Planet. Space Sci.*, **55**, 1712–1728.