

金星探査機あかつき搭載カメラの撮像対象の特定

高木聖子 [1], 岩上直幹 [1]

[1] 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

1 はじめに

金星は厚い硫酸の雲に覆われているため、雲の下領域を観測することは難しい。しかし、1983年に $1 \sim 2.4 \mu\text{m}$ の近赤外領域において、いくつかの波長（大気窓）では金星の雲を見透かせることが分かった [Allen & Crawford, 1984]。この波長の光に感度をもつカメラを探査機に搭載し、金星周回軌道上から金星の大気運動を詳細に調べる観測計画（あかつき（Planet-C）, JAXA, 2010 年打ち上げ）が現在進行している。あかつきには複数の波長の光を観測するために 5 台のカメラが搭載される（IR1, IR2, LIR, UVI, LAC）。光は雲や大気への通りにくさ（光学的厚さ）が波長ごとに異なっているため、波長が違えば見える高度（代表高度）が異なる。つまり 5 台のカメラはそれぞれ観測対象が異なり同時に異なる高度を観測できる。しかし各カメラの撮像対象についてはいくつか問題点がある。1 つ目は、かつて得られた $0.9 \mu\text{m}$ 撮像画像で見られる金星表面のわずかな濃淡の原因が不明なことである。2 つ目は、あかつき搭載カメラの IR1・IR2 の代表高度が不明瞭なことである。3 つ目は雲の温度や高度などの可変要素が、撮像データに及ぼす影響が分からないことである。これらの問題を解決するべく、本研究では以下の 3 つを目的とする。

■ 目的 1: 明るさ変化率 3 % の原因を調べる かつて木星探査機 Galileo（アメリカ）が金星をフライバイした際、IR1 が用いる波長と近い波長（ $0.9 \mu\text{m}$ ）で金星が撮像された。その撮像画像にはゴムボールのような表面の明るさに濃淡がない金星が写っており、明るい部分と暗い部分の明るさの差はわずか 3 % だった。本研究では放射輸送計算を用

いて $0.9 \mu\text{m}$ 撮像で見られる明るさ変化率 3 % が何に起因するか調べる。

■ 目的 2: あかつき搭載カメラ IR1 の代表高度を求める 金星における紫外光、中間赤外光の代表高度はそれぞれ 65 km [Kawabata et al., 1980]、70 km と言われている。そして、あかつきで中心的な役割を果たす近赤外光の代表高度は 50 km [Belton et al., 1991][Carlson et al., 1991] と予想されている。しかし金星の紫外・近赤外光代表高度を定量的に見積もった例は今までにない。あかつきによって金星大気を 3 次元的に理解するためには、搭載カメラの代表高度を高い精度で決めることは最重要課題である。本研究では放射輸送計算による代表高度特定の手法を確立し、近赤外光の代表高度を初めて特定することを目的とする。

■ 目的 3: 雲頂高度・温度が及ぼす放射強度に対する影響を知る あかつき搭載カメラから得られる撮像データには様々な情報（雲の光学的厚さ・雲頂高度・気温など）が反映されることが予想される。金星大気理解にはそれらの情報の分離が不可欠である。本研究では雲の光学的厚さや雲頂高度などのパラメータを変えて放射輸送計算を行うことで、各カメラが用いる波長における太陽散乱光や熱放射の放射強度への各パラメータからの寄与を知る。

2 計算手法

本研究では図 1 のように金星大気・雲に対して θ_{in} で入射し、 θ_{out} で出射した太陽散乱光（波長は任意）の放射強度 I を Adding & Doubling 法を用いて近似的に求めた。大気吸収は line-by-line 法、大気モデルは VIRAS5 (Keating et al., 1985)、吸収線データは HITRAN 2004 (Rothman et al., 2005) を用いた。Adding & Doubling 法による計算に必要な雲モデル（各雲粒子の光学的厚さ鉛直分布）は、これまでの金星降下プローブの観測結果（全 7 種類）から作成した。図 2 は作成した雲モデルである。

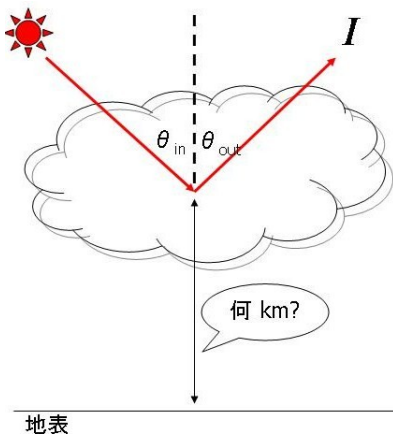


図 1 金星大気・雲を通過する太陽光（波長は任意）の模式図。本研究では θ_{in} で入射し、 θ_{out} で出射した光を考える。

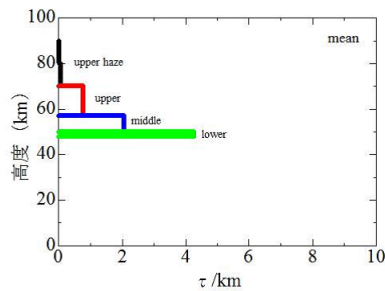


図 2 観測結果を元に作成した雲モデル

また、作成した雲モデル（図 2）と元の観測結果から雲の光学的厚さ変動率を見積もった（表 1）。これは、図 2 の雲モデルに対する各観測結果の各雲層の光学的厚さ変動である。

表 1 観測結果から見積もった雲の光学的厚さ変動率

雲層	負の最大偏差		正の最大偏差
もや層 (70-90 km)	-50	-	+ 50 %
上層 (57-70 km)	-70	-	+ 100 %
中層 (50-57 km)	-42	-	+ 86 %
下層 (47.5-50 km)	-76	-	+ 135 %

3 計算結果

3.1 目的 1: 明るさ変化率 3 % の原因を調べる

標準雲頂高度を 84 km とし、高度偏差を + 4 km、± 0 km、- 4 km と 3 通り変化させる。同時に雲の光学的厚さを 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍と 4 通り変化させて放射輸送計算を行い、太陽散乱光（0.9 μm ）の放射強度を求めた。雲頂高度 84 km において、雲の光学的厚さを 4 通り変化させて計算を行った結果の太陽散乱光スペクトルを 0.9 μm 昼面用フィルタ特性と共に図 3 に示す。また雲の光学的厚さ 1 倍において、雲頂高度を 3 通り変化させて計算を行った結果の太陽散乱光スペクトルを 0.9 μm 昼面用フィルタ特性と共に図 4 に示す。フィルタをかけ全波長で積分した結果が図 5 である。放射強度（明るさ）には雲頂高度より雲の光学的厚さが効くことが分かった。

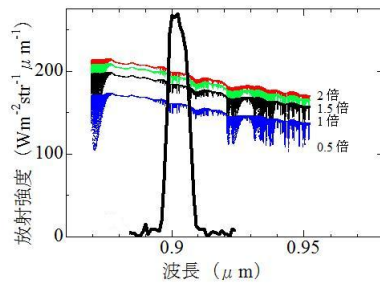


図 3 光学的厚さ別 0.9 μm 放射強度スペクトルと 0.9 μm 昼面用フィルタ特性

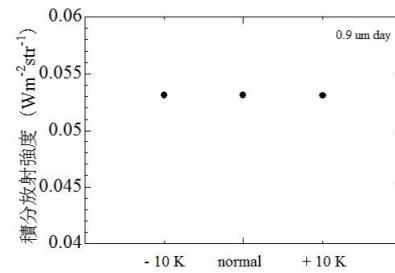


図 6 0.9 μm 積分放射強度の温度応答

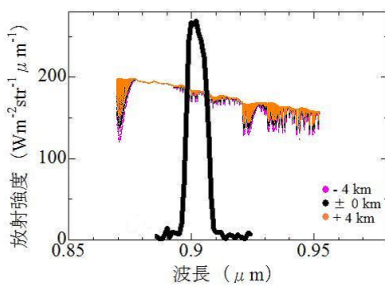


図 4 雲頂高度偏差別（標準雲頂高度は 84 km）0.9 μm 放射強度スペクトルと 0.9 μm 昼面用フィルタ特性

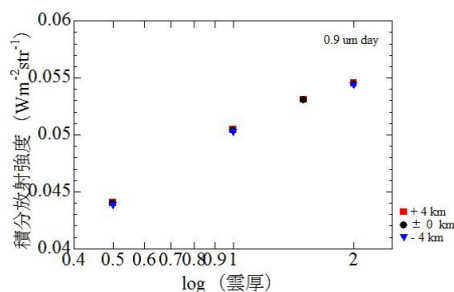


図 5 0.9 μm 積分放射強度の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答。高度応答は小さいため、3 点が重なってしまっている。

また、図 6 は雲および大気のを -10 K 、 $\pm 0\text{ K}$ 、 $+10\text{ K}$ と 3 通り変化させて計算を行った結果である。放射強度には温度はほとんど影響しないことが分かった。以下に結果をまとめる。

- 雲頂高度が 4 km 上昇すると雲は 0.010 % 明るくなる
- 雲の光学的厚さが 1.5 倍厚くなると雲は 4.1 % 明るくなる
- 雲の温度が 10 K 上がると雲は 0.038 % 明るくなる

雲頂高度 4 km 上昇・光学的厚さ 1.5 倍増・温度 10 K 上昇とは、現実には起こり得る変化である（例えば Ignatiev et al., 2009 ; James et al., 1997 ; Grassi et al., 2008 など参照）。以上より、明るさ変化率 3 % の原因は各場所における雲の光学的厚さの差であることが分かった。

3.2 目的 2: あかつき搭載カメラ IR1 の代表高度を求める

0.9 μm 撮像の明るさ変化率は各場所における雲の光学的厚さの差が影響することが分かった。これを利用して 0.9 μm (IR1) の代表高度を特定する。

目的 1 では雲全体の光学的厚さを変えて太陽散乱光の放射強度を求めた。その結果、図 5 で示したように 0.9 μm 撮像では雲が光学的に厚（薄）ければ雲が明るい（暗い）ことが分かった。ここから

表 1 を用いて雲層ごとに光学の厚さを変えた場合の放射強度への影響を考える。かつての見積もりでは 1 回の観測結果で近赤外代表高度を特定していたが、表 1 で変動率を考えることで降下プローブの観測結果を全て使ったことになる。今まで考慮されなかった実際の金星の雲層ごとの雲厚変化を考慮することで、より現実に近い結果が期待できる。この表に従って雲モデルを変化させ、全ての雲層で明るさ変化率を計算した (図 7)。

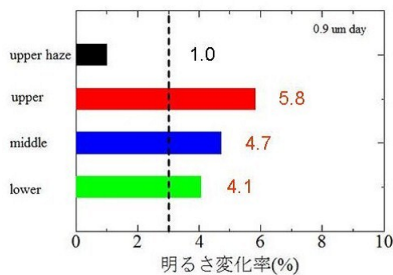


図 7 明るさ変化率 (0.9 μm 昼)

表 1 に従って、雲モデル (図 2) の各雲層の光学の厚さを独立に動かし、標準状態の雲の明るさに対する明るさの増減を求めた。各雲層で得られた正・負の 2 つの値の絶対値の和が明るさ変化率である。今までの見積もりでは 0.9 μm の代表高度は 50 km とされていたので、下層の大きな光学の厚さ変動だけが 3 % を超える明るさ変化を引き出せると予想されていた。つまり表 1 で見積もったように、下層雲の光学の厚さ変動が大きな雲を近赤外波長で上から見ると 3 % くらいの明るさのムラとなって現れ、すなわち近赤外撮像では下層雲が見えるというのが今までの予想である。ところが今回の見積もりでは図 7 に示したようにもや層以外の変化は 3 % を超えている。つまりもや層以外は 0.9 μm 撮像で見える可能性がある。この計算結果は、下層雲で大きな光学の厚さ変動があってもそれより上に乗っている雲が厚いために、その変動が目立たなくなるすりガラス効果が働いた結果と考えられる。つまり上層で大きな光学の厚さ変動があれば近赤外撮像で十分に見える可能性がある。

3.3 目的 3: 雲頂高度・温度が及ぼす放射強度に対する影響を知る

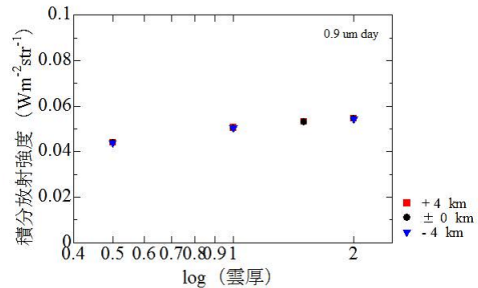


図 8 0.9 μm 積分放射強度の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答

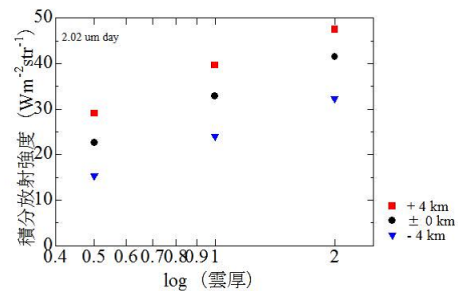


図 9 2.02 μm 積分放射強度の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答

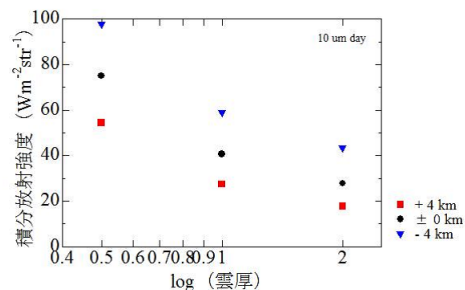


図 10 10 μm 積分放射強度の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答

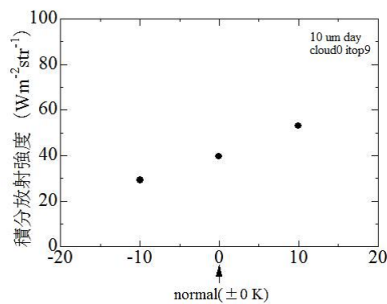


図 11 10 μm 積分放射強度の温度応答

図 8 は 0.9 μm 昼における雲の光学的厚さ・高度偏差応答である。先に記述したように 0.9 μm で見たときの雲の明るさには雲の光学的厚さが効く。

IR2 は 2.02 μm で昼面の太陽散乱光を測定する。この波長域では CO_2 による吸収があるので雲高の違いが放射強度にはっきりと現れる。これを利用して IR2 では雲頂高度の特定を試みる。図 9 は 2.02 μm 積分放射強度の雲の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答である。計算に使用した 2.02 μm 昼面用フィルタ特性は図 12 に示した。図 8 と比較すると、2.02 μm の場合は雲頂高度が違えば放射強度に違いが出ることは一目瞭然だが、雲の光学的厚さが違って放射強度に違いが出るのが分かった。つまり、2.02 μm 撮像では雲の光学的厚さ情報と雲頂高度情報が混ざってしまうので、両者の分離をする必要がある。

LIR は 10 μm を中心とした波長幅 4 μm に感度を持つ。この波長では雲層上端からの熱放射を測定し、雲頂温度の特定を試みる。図 10・図 11 はそれぞれ 10 μm 積分放射強度の雲の光学的厚さ・雲頂高度偏差応答と温度応答である。計算に使用した 10 μm フィルタ特性は図 13 に示した。10 μm 撮像では放射強度は雲の光学的厚さ・雲頂高度・雲頂温度の変化に敏感だということが分かった。つまりこの結果は、10 μm 撮像において雲の光学的厚さ情報・雲頂高度情報・温度情報の分離をする必要があることを示している。

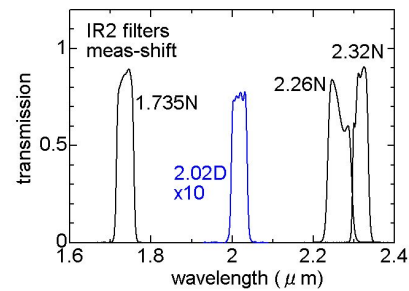


図 12 IR2 フィルタ特性

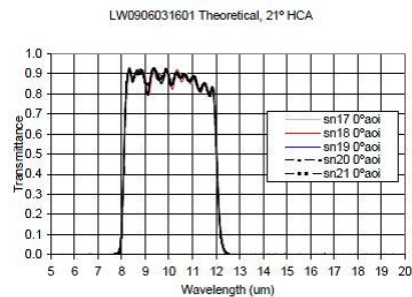


図 13 LIR フィルタ特性

ここで、あかつき撮像データに混在する様々な情報の分離方法を提案する。IR1 で予想されるランダムノイズは 0.3 % である。つまり撮像で得られた放射強度 I には 0.3 % の誤差が生じる。0.9 μm 撮像では雲の光学的厚さ情報が得られるが、放射強度の誤差はこの波長において光学的厚さ ± 1 に相当する。2.02 μm 撮像では光学的厚さと雲頂高度情報が得られる。ここから 0.9 μm 撮像で得られた雲の光学的厚さを引くことで、2.02 μm における雲頂高度情報のみ取り出せる。放射強度に 0.3 % の幅があることを考慮すると、この波長における雲頂高度は $\pm 0.03 \text{ km}$ の誤差で評価することができる。10 μm 撮像では光学的厚さ・雲頂高度・雲頂温度情報が得られる。ここから 0.9 μm 撮像で得られた雲の光学的厚さを引くことで、10 μm における雲頂高度情報が取り出せる。放射強度に 0.3 % の幅があることを考慮すると、この波長における雲頂高度は $\pm 0.03 \text{ km}$ 、雲頂温度は $\pm 0.09 \text{ K}$ の誤差で評価することができる。

4 まとめ

本研究では放射輸送計算を用いて、あかつき搭載カメラの撮像対象の特定を試みた。

木星探査機 Galileo から得られた $0.9\ \mu\text{m}$ 撮像画像では、金星表面の明るさ変化率がわずか 3% だった。その 3% の濃淡を生じさせる原因を調べるため、雲のパラメータ（雲の光学的厚さ・雲頂高度など）を変えて放射輸送計算を行い、太陽散乱光（ $0.9\ \mu\text{m}$ ）放射強度への各パラメータからの寄与を求めた。その結果、雲の明るさには雲の光学的厚さの変化が最も敏感であることが分かった。つまり、明るさ変化率 3% の原因は雲の各場所における光学的厚さの差であることが分かった。

これまで見積もられた例がないため、IR1・IR2 の代表高度が曖昧であるという問題があった。IR1・IR2 の代表高度を特定するため、今までの金星降下プローブの観測結果を全て使い雲層ごとに明るさ変化率を計算した。その結果、IR1・IR2 の代表高度は $50\ \text{km}$ というこれまでの予想に反し、両カメラとももや層以外は見える可能性があるという結果になった。ただしこの結果は今までの金星降下プローブの観測結果を全て使ったため、時間・空間情報が混ざっている。そこで時間・空間情報の分離をするため各雲層が変動するスケールや変動する可能性を考慮して代表高度の絞り込みを試みた。その結果、IR1・IR2 の代表高度は従来の考え通り下層雲である可能性が最も高いが、他の雲層も十分に見える可能性があることを忘れてはいけない。

IR2 の $2.02\ \mu\text{m}$ では雲頂高度、LIR の $10\ \mu\text{m}$ では雲頂温度の特定を試みる。したがって放射輸送計算をそれぞれの波長で行い、雲頂高度や雲頂温度の変化が雲の明るさに及ぼす影響をあらかじめ知っておく必要がある。そこで雲のパラメータ（雲の光学的厚さ・雲頂高度など）を変えて放射輸送計算を行い、 $2.02\ \mu\text{m}$ 太陽散乱光放射強度、 $10\ \mu\text{m}$ 熱放射強度への各パラメータからの寄与を求めた。その結

果 $2.02\ \mu\text{m}$ においては、雲の光学的厚さと雲頂高度の情報が混ざることが分かった。また $10\ \mu\text{m}$ においては、雲の光学的厚さ・雲頂高度・雲頂温度情報が混ざることが分かった。このように撮像データには様々な情報が混ざる。情報の分離をする必要があることに注意したい。