Cassini/ISS データで探る木星雲の散乱特性について

佐藤隆雄1、佐藤毅彦2、笠羽康正1

1: 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

2: ISAS/JAXA

1. 序論

木星には、 NH_3 氷雲(\sim 0.7 bar)、 NH_4SH 雲(\sim 2.2 bar)、 H_2O 氷雲(\sim 6 bar)からなる 3 層の雲層構造が存在することが平衡雲凝結モデルから推測されている[Weidenschilling and Lewis, 1973]。この雲層構造が Galileo entry probe により直接的に示されることが期待されたが、hotspot と呼ばれる特異な乾燥領域に突入してしまったため、今もなお、その代表的な雲層構造の理解には至っていない。

リモートセンシングでは、可視-近赤外波長 域に存在する CH4 吸収帯における反射太陽光 観測から雲層構造の導出が試みられてきた [e.g., Satoh and Kawabata, 1992, 1994, Chanover, 1997, Banfield et al., 1998]。Sato et al. [2008]は、 CH、吸収帯の中心から連続帯までを分光撮像 観測することにより、木星では初めて雲底高 度などを仮定せずに観測データのみから雲層 構造の決定を行った。こうした雲層構造や雲 の光学的特性の導出には雲粒子の多重散乱を 考慮する必要があり、雲粒子の散乱位相関数 の理解が重要となる。散乱位相関数の導出に は広い太陽位相角での観測が必要不可欠であ るが、地上からでは太陽位相角が 0-12° に限 定されているため不可能である。従って一般 によく用いられる散乱位相関数は、Pioneer 10 号が 1973 年 12 月に行った木星フライバイに おける Imaging Photopolarimeter (IPP)によって 取得された画像データ(青:440 nm、赤:640 nm、 太陽位相角12-150°)の解析結果に基づいてい

る [Tomasko et al., 1978]。今日に至るまで、前 述の近赤外反射光解析には Pioneer 10 号/IPP の赤波長で得られた散乱位相関数がそのまま 代用されており、散乱特性の波長依存性につ いては考慮していないのが現状である。また 青・赤の波長ともにバンド幅が広く(それぞれ 390-500 nm、595-720 nm)、散乱特性が平均化 されているため、データ自体が波長依存性を 考慮するのに適しているとは言い難い。つま り、この雲粒子の散乱位相関数の不確定さこ そが雲層構造の理解を阻む要素の一つである と考えている。そこで我々はこの問題点に着 目し、2000年に木星をフライバイした土星探 査機 Cassini に搭載されている Imaging Science Subsystem (ISS)によって取得された木星画像 を用いて散乱位相関数の改訂を目標に解析を 進めている。

2. Cassini/ISS データ

Cassini は2000 年 10 月から2001 年 3 月にかけて木星フライバイ観測を行った。Pioneer 10 号/IPP データの解析結果との比較のため、本研究では ISS/Narrow Angle Camera (NAC)のBL1 (451 nm)、CB2 (750 nm)の2 波長によって広い太陽位相角(4-137°、合計11点)で取得された画像データを用いた。選出した画像データはすべて同じゲインで取得されたものである。また解析領域は South Tropical Zone (STrZ)である。データ校正には Cassini Imaging

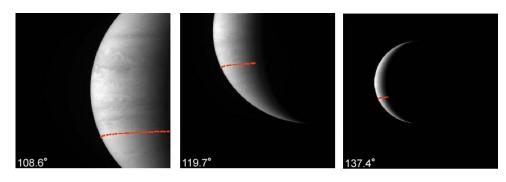


Fig. 1. 解析に使用した校正後の木星画像の一部 点線は解析領域(STrZ)を、数字は太陽位相角を示している。

Science Subsystem Calibration tool (CISSCAL) を利用した[Porco et al., 2004]。これにより各ピクセルでの太陽反射率を求めることができる。 **Fig. 1** に校正後の木星画像の一部と解析領域を示す。

3. 放射伝達解析

散乱位相関数の導出はBL1、CB2 それぞれ において行う。広い太陽位相角(11点)での周 辺減光曲線(反射率の経度変化)を再現する散 乱位相関数を導出するため、adding-doubling 法を用いて放射伝達計算を行った[Goody and Young, 1989]。雲構造モデルは、Tomasko et al. [1978]の Type I と同等のもの(Cloud Model I)を 採用した[Fig. 2]。これは有限なガス層の下に 半無限の雲層が存在する簡単なモデルである が、広い太陽位相角で得られた周辺減光曲線 をよく再現する重要なケースである。この2 波長における CH4 吸収量は Karkoschka [1994] の CH4 吸収係数と各フィルターの透過特性を もとに計算した。求めるべき雲層の散乱位相 関数は、(1)に示すような二項 Henyey-Greenstein 関数によって近似できるも のとした。決定すべき変数は Fig. 2 に青字で 示したガス層の圧力差ΔP、雲層の一次散乱ア ルベド ω_{CL} 、さらに散乱位相関数のパラメー $g(f,g_1,g_2)$ の合計5つである。

二項 Henyey-Greenstein 関数:

$$P(\Theta) = f \cdot P(g_1, \Theta) + (1 - f) \cdot P(g_2, \Theta)$$

$$P(g,\Theta) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\cos\Theta)^{\frac{3}{2}}$$

$$(0 \le f \le 0.95, 0.1 \le g_1 \le 0.95, -0.1 \le g_2 \le -0.95)$$

$$\cdot \cdot \cdot (1)$$

変数の決定手法は以下のとおりである。

- 1) 格子状に (f,g_1,g_2) を配置する。
- 2) ある格子点 (f,g_1,g_2) において残りのパラメータ $(\tau_R(\Delta P),\omega_{CL})$ を Marquardt 法によって最適化する。
- 3) 2)をすべての格子点において行う。

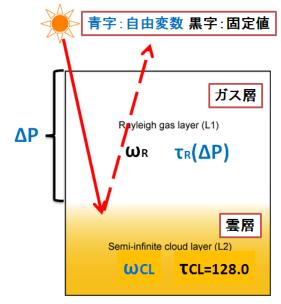


Fig. 2. 木星雲鉛直構造モデル(Cloud Model I)

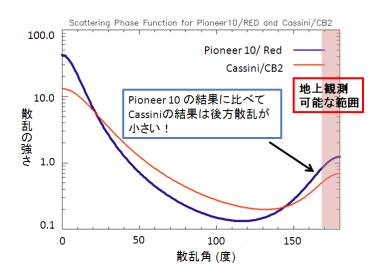


Fig. 3. Pioneer 10 号/IPP の赤波長における散乱位相関数(青線)と本研究で得られた Cassini/ISS の CB2 における散乱位相関数の比較(赤線)

Table 1. Cassini/ISS データを用いた最適化結果と Tomasko et al., [1978]との比較

	BL1 (451 nm)	CB2 (750 nm)
(f,g_1,g_2)	(0.89, 0.65, -0.45)	(0.97, 0.65, -0.70)
([Tomasko et al.])	(0.969, 0.80, -0.80)	(0.938, 0.80, -0.70)
ω_{CL}	0.9992	0.9983
ΔP (bar)	0.138	0.0

最終的な散乱位相関数の決定には仮定した 雲構造モデルが妥当であるかということも考 慮すべきである。従って、下記に示す 2 点に よってモデルの妥当性を判断した。

- A) 11 点の太陽位相角における周辺減光曲線 の観測値とモデル値の乖離が最小である こと
- B) 雲頂高度 ΔP が BL1 と CB2 で概ね一致すること

4. 結果・考察

最適化結果を Fig. 3 及び Table 1 に示す。 Fig. 3 から分かるように今回得られた Cassini/ISS の CB2 における散乱位相関数は、 Pioneer 10

号/IPP の赤波長でのそれに比べ、後方散乱が弱いという結果を得た。一方で雲頂高度については両波長で全く一致しなかった。

Tomasko et al. [1978]は、以下に示す2つの 理由から Type I を棄却している。ここではこ の2点に対して本研究の結果と比較しながら 考察する。

1) 位相角 12°の周辺減光曲線への当てはまりが非常に悪い点

同じ雲構造モデル、太陽位相角におけるベストフィット結果を **Fig. 4** に示す。 Pioneer 10 号/IPP の赤波長データではこのモデルに対して、limb で著しく合わないことが見てとれる。

しかし Cassini/ISS の CB2 データではこの位相 角データも含め、おおよそ観測結果を再現で きることが分かった。Pioneer 10 号/IPP は主に 「ゲインモード 13」でデータを取得している が、位相角 12°でのデータは「ゲインモード 12」で取得されている。我々は、この当ては まりの悪さは異なるゲインによるキャリブレ ーション誤差に起因しているのではないかと 推測している。つまり Pioneer 10 号/IPP デー タでは「反射率が高めに計算されている位相 角 12°(後方散乱成分に大きく寄与する位相 角)のデータを再現するために、後方散乱成分 $(1-f)\cdot P(g_2,\Theta)$ の値が大きくなっていると考 えることができる。

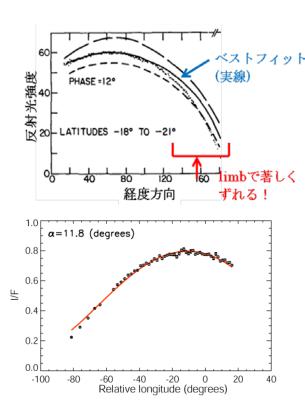


Fig. 4. 太陽位相角 12° におけるベストフィット結果

(上) Pioneer 10/IPP (下) Cassini/ISS

2) 太陽位相角 150°の高い反射率を再現するためには雲頂高度があまりにも高くなる(数 10mbar)点

今回解析した波長は CH4による分子吸収が 非常に小さいため、ほとんど雲頂高度に感度 をもたない。しかし太陽位相角が大きくなる と大気を通過するパスが長くなるため、ある 程度雲頂高度に対して感度が出てくる。実際 Pioneer 10 号/IPP の位相角 150°のデータでは 雲頂高度を変化させると周辺減光曲線が limb 付近でかなり変化することが分かっている [Fig. 10. in Tomasko et al., 1978]。しかし、Fig. 5 に示すように Cassini/ISS の最大位相角 137° のデータには雲頂高度に感度がほとんどない。

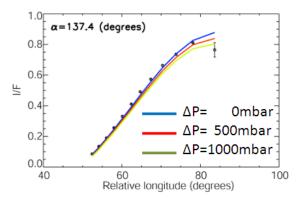


Fig. 5. 雲頂高度を変化させた場合の太陽位相 角 137°での周辺減光曲線の変化

つまり、今回 CB2 では雲頂高度が 0 bar という結果を得たが、これは今回用いた太陽位相角の範囲では雲頂高度に対して感度がないために、意味をなさないものである。おそらく150°以上の高位相角データを加えた場合今回の雲モデルでは、Tomasko et al. [1978]の結果同様、雲頂高度が理論や他の観測結果と比較して、高くなりすぎると予想される。しかし Cassini は最大 140°までしかデータがないため、今回 Cassini のデータのみから Cloud

Model I を棄却することはできないことが分かった。

5. まとめ

- ・Cassini/ISS の木星フライバイデータを用いて、Pioneer10号データ以来となる雲粒子の散乱位相関数の導出を行った。
- ・Pioneer 10 の位相角 12° のデータには取得 時のゲインの違いによるキャリブレーション 誤差が含まれている可能性が否定できない。 そのため、後方散乱が強いという結果が得ら れたと推測される。
- ・今回仮定した雲構造モデル(Cloud Model I) の妥当性を明らかにするためには、広位相角 $(>140^{\circ})$ データが必要となることが分かった。

6. 今後の研究にむけて

幸いにも、木星探査機 Galileo の Solid State Imager (SSI)は高太陽位相角(146°、167°)において紫(411 nm)と近赤外(756 nm)波長でデータを取得している。観測時期や波長の類似性から Pioneer データよりも Galileo データをCassini データと結合する方が適していると考えている。今後は Galileo データも利用し、ヘイズ層を含めた雲構造モデルを想定し、広い太陽位相角での周辺減光曲線を再現するモデルと 散乱位相 関数(今回使用した二項Henyey-Greenstein 関数に加え、Mie 散乱位相関数)を導出するべく研究を進めていきたい。

7. Reference

Banfield et al. [1998], Icarus, 134, 11-23.

Goody, R. M., and Y. L. Young [1989], Atmospheric Radiation, Second Edition, New York: Oxford University Press.

Chanover, N. [1997], Ph. D Thesis, New Mexico

State University.

Karkoschka [1994], Icarus, 111, 174-192.

Sato, T. [2008], Master Thesis, Tohoku University.

Satoh, T and K. Kawabata [1992], Astrophys. J., 384, 298-304.

Satoh, T and K. Kawabata [1994], J. geophys. Res., 99, 8425-8440.

Tomasko et al., [1978], Icarus, 33, 558-592.

Weidenschilling, S. J. and J. S. Lewis [1973], Icarus, 20, 465-476.