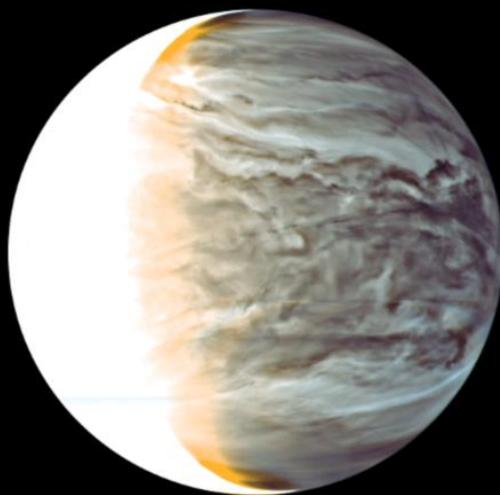


「あかつきIR2データと放射計算による金星雲頂構造の推定」



佐藤隆雄
ISAS/JAXA

放射伝達モデル

放射伝達モデル

□ 理論 [平行平面大気を仮定]

放射伝達方程式

太陽反射光: 1-3
熱放射: 1,2,4

1. 光の消散

2. 多重散乱

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau, \mu, \phi) - \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' - \frac{\omega}{4\pi} P(\tau, \mu, \phi, -\mu_0, -\phi_0) \pi F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) - (1 - \omega) B(T)$$

3. 太陽光の一次散乱

4. 熱放射

[I : 放射輝度, τ : 光学的厚さ, ω : 一次散乱アルベド, P : 散乱位相関数, πF_0 : 太陽直達光, (μ, ϕ) : 光の入射(射出)方向, $B(T)$: プランク関数]

$I(\tau, \mu, \phi)$ のままでは数値計算が困難 \Rightarrow 放射輝度 I は τ だけの関数に.

ϕ : フーリエ級数展開

$$I(\tau, \mu, \phi) = \sum_m (2 - \delta_{0m}) I^m(\tau, \mu) \cos m(\phi - \phi')$$

μ : ガウス・ルジャンドル求積法で離散化

$$I^m(\tau, \mu) = \sum_i I^{m,i}(\tau) \mu_i w_i$$

放射伝達モデル

□ "doubling and adding method" [e.g., Goody and Young, 1983]

- 散乱大気放射伝達過程を扱う代表的な手法の一つ

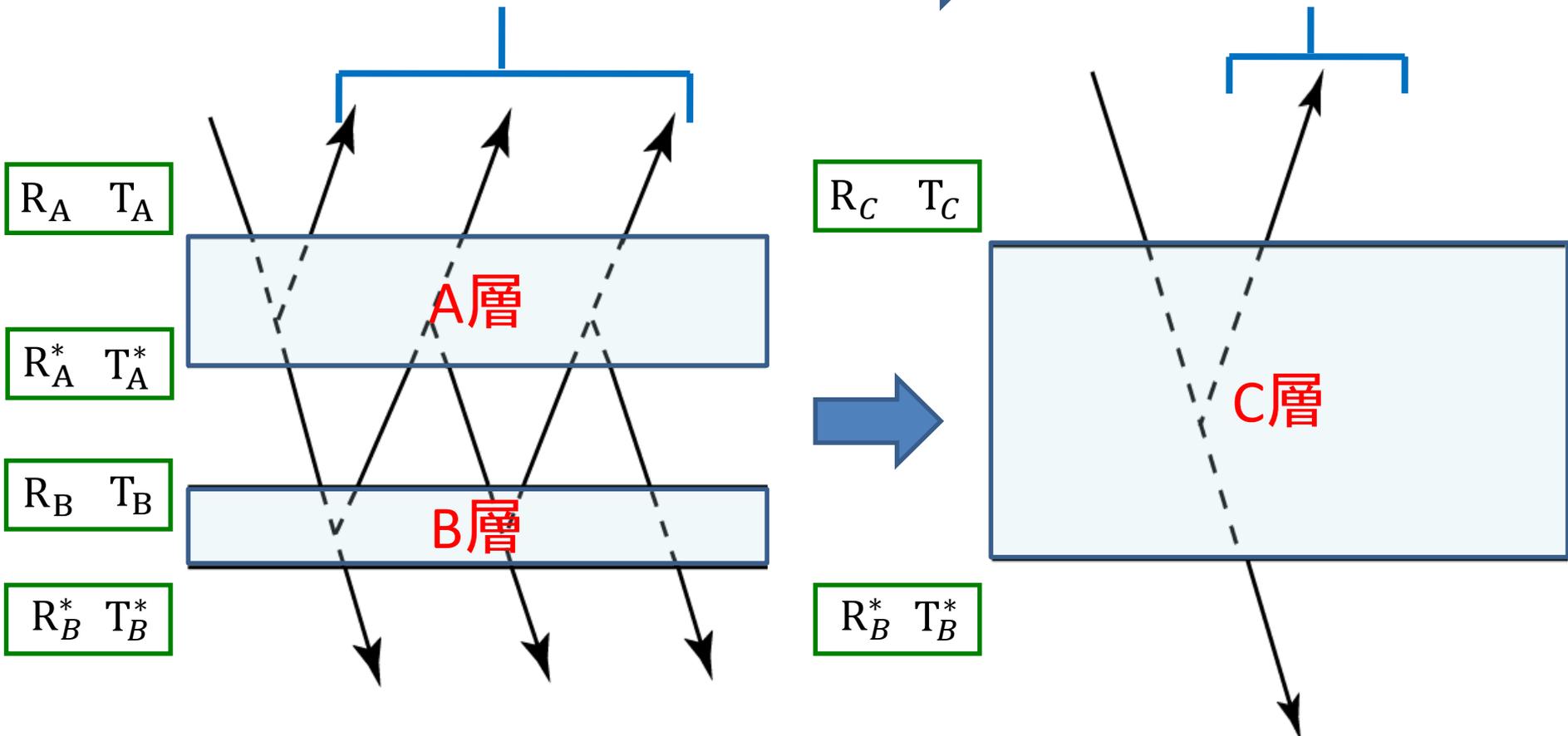
多重散乱の取り扱い方: 層を次々に合成 (C層=A層+B層)

(R : 反射行列, T : 透過行列)

1回散乱+多重散乱を経た反射光

行列計算

1本の反射光として記述する



放射伝達モデル

- 元の層まで、上下の層を足し合わせていくのがadding法、足し合わせる層が同一の光学的特性をもつとき、特にdoubling法と呼ぶ。
- では**初期層**はどうとるか？
1回散乱程度の薄い層($\tau_0 \approx 10^{-6}$)まで層を分割して出発。
∴ 解析的に解が計算できる (この場合は, $R = R^*$, $T = T^*$)

$$R(\tau_0, \mu, \phi, \mu', \phi') = \frac{\varpi}{4(\mu + \mu')} P(\tau, \mu, \phi, -\mu', \phi') \left\{ 1 - \exp \left[-\tau_0 \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu'} \right) \right] \right\}$$

$$T(\tau_0, \mu, \phi, \mu', \phi') = \begin{cases} \frac{\varpi}{4(\mu - \mu')} P(\tau, -\mu, \phi, -\mu', \phi') \left[\exp \left(-\frac{\tau_0}{\mu} \right) - \exp \left(-\frac{\tau_0}{\mu'} \right) \right] \\ \frac{\varpi \tau_0}{4\mu'^2} P(\tau, -\mu', \phi, -\mu', \phi') \exp \left(-\frac{\tau_0}{\mu'} \right) \end{cases}$$

光学的厚さ, 一次散乱アルベド, 散乱位相関数: 入力パラメータとして必要

放射伝達モデル

□ 放射計算コード

- 散乱大気中での太陽放射 (Sato et al., 2013)
- 散乱大気中での熱放射
- 灰色大気中での熱放射 (Sato et al., 2014)
- 入力モジュールを変更すると, 分子・エアロゾルの光学的特性を計算しLine-by-Lineを実行.

□ 数値計算上考慮していること

- Renormalization of scattering phase function (Hansen, 1971)

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') d\Theta = 1$$

- Second order scattering in homogeneous layer (Hovenier et al., 2004)
初期層において, 二次散乱まで解析的に求める
- 初期層の厚さを厚くできる, 特殊ケース ($\omega = 1$) でも精度を維持できる.
- Separation of single scattering from azimuthal Fourier series of reflection and transmission matrices (de Haan et al., 1987)

波長より粒径が大きいエアロゾルを考慮する場合に効果あり

$$R(\tau_0, \mu, \phi, \mu', \phi') = R_1(\tau_0, \mu, \phi, \mu', \phi') + \sum_m (2 - \delta_{0m}) [R^m(\tau_0, \mu, \mu') - R_1^m(\tau_0, \mu, \mu')] \cos m(\phi - \phi') \quad 6$$

放射伝達モデル

放射計算コードの精度検証: 金星版Rstarとの比較

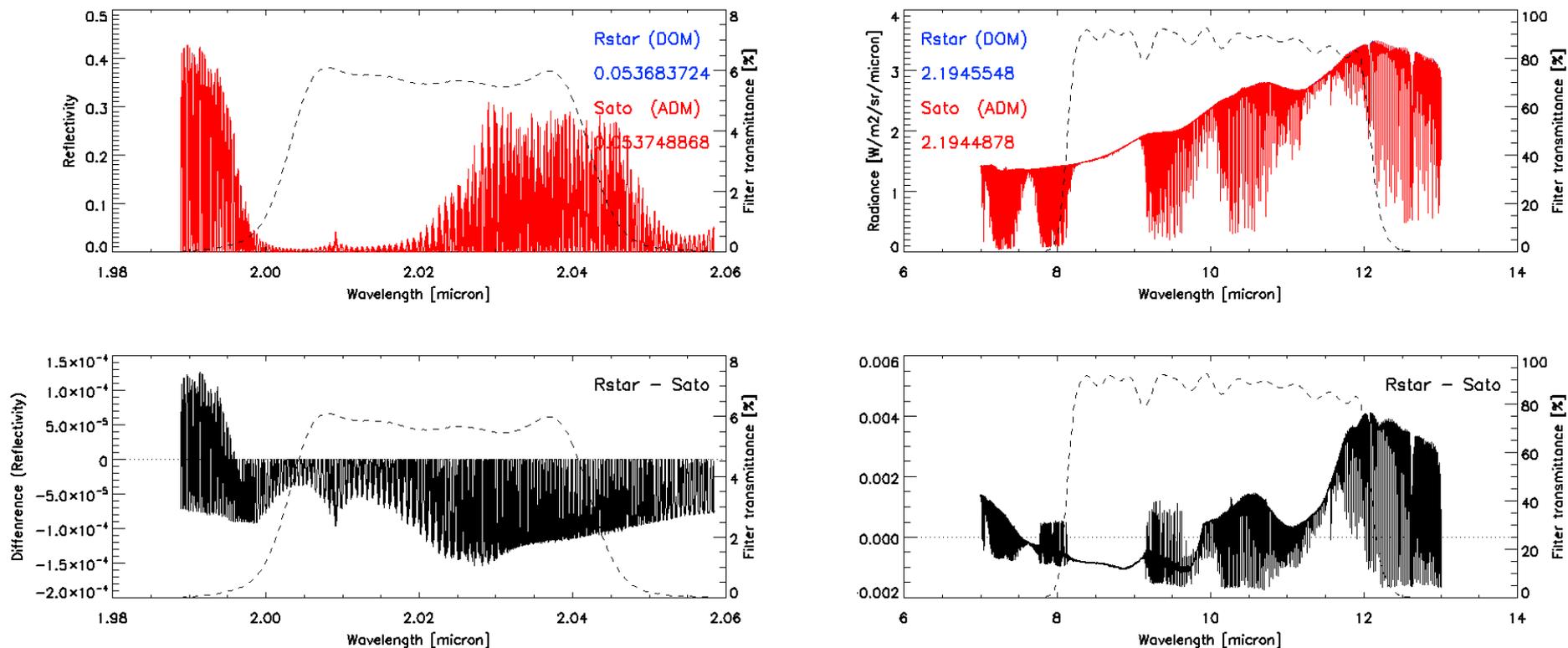
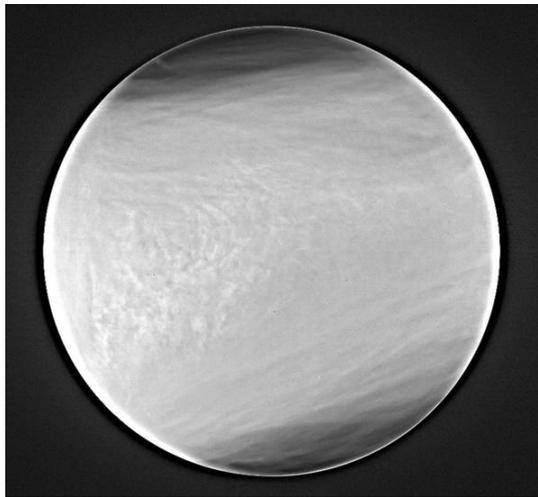


図. (左) Akatsuki/IR2 2.02 μm , (右) Akatsuki/LIRの場合の精度検証.

IR2, LIRのどのチャンネルでも0.5% (*) 以下で整合

* Rstarの雲の光学テーブルが粗かったということでまだ改善の余地あり.

「あかつき」IR2昼面データを用いた 金星雲頂構造の推定



- 最終ゴール：
 - ピクセルごとに反射太陽光の明るさを雲頂高度に焼き直したい。

はじめに

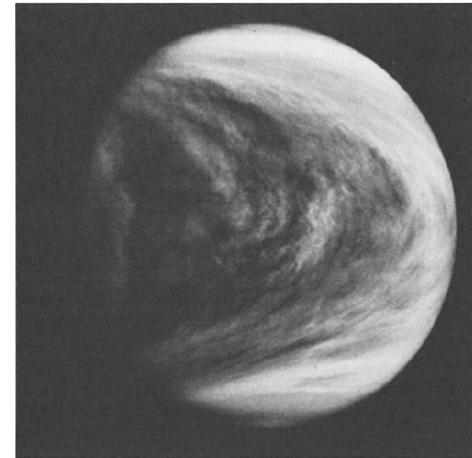
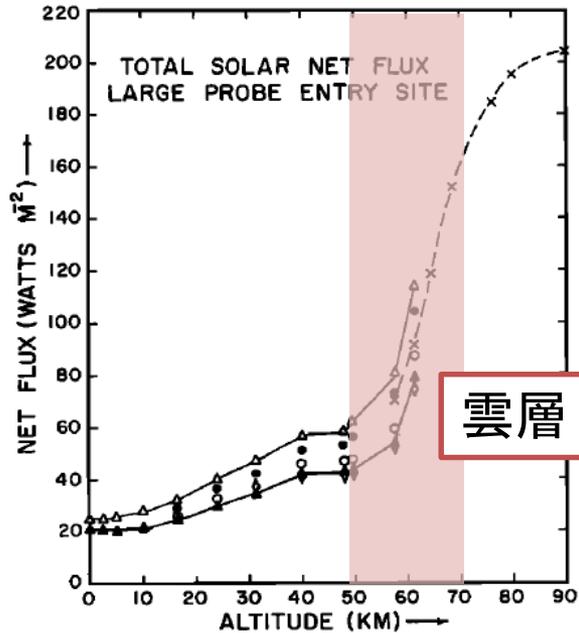
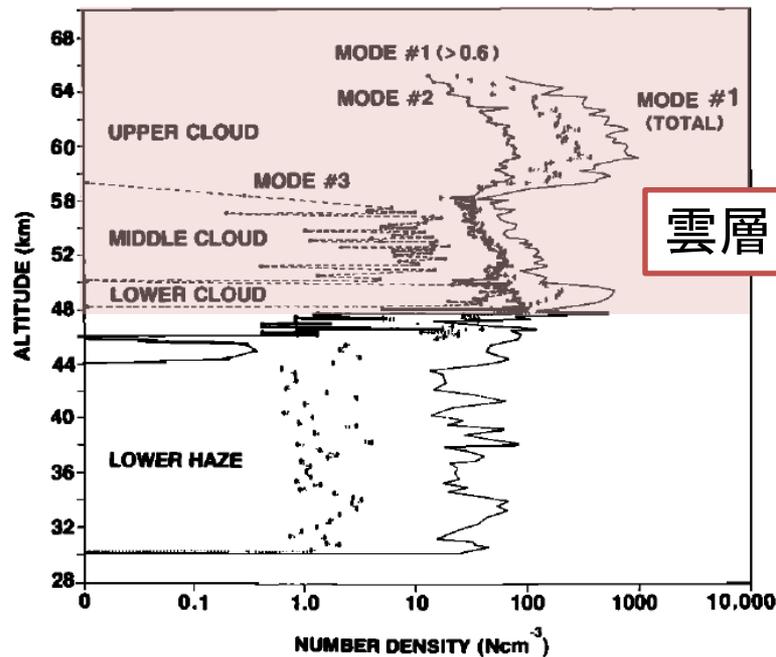


図. (左) PV probe entry siteにおける金星雲の高度分布 [Knollenberg and Hunten, 1980], (中) PV probe entry siteにおける入力太陽光フラックスの高度分布 [Tomasko et al., 1980], (右) PV/OCPPの紫外画像 [Rossow et al., 1980].

□ 厚い硫酸雲 (50-70 km) [$\tau \sim 20-40$ @可視光]

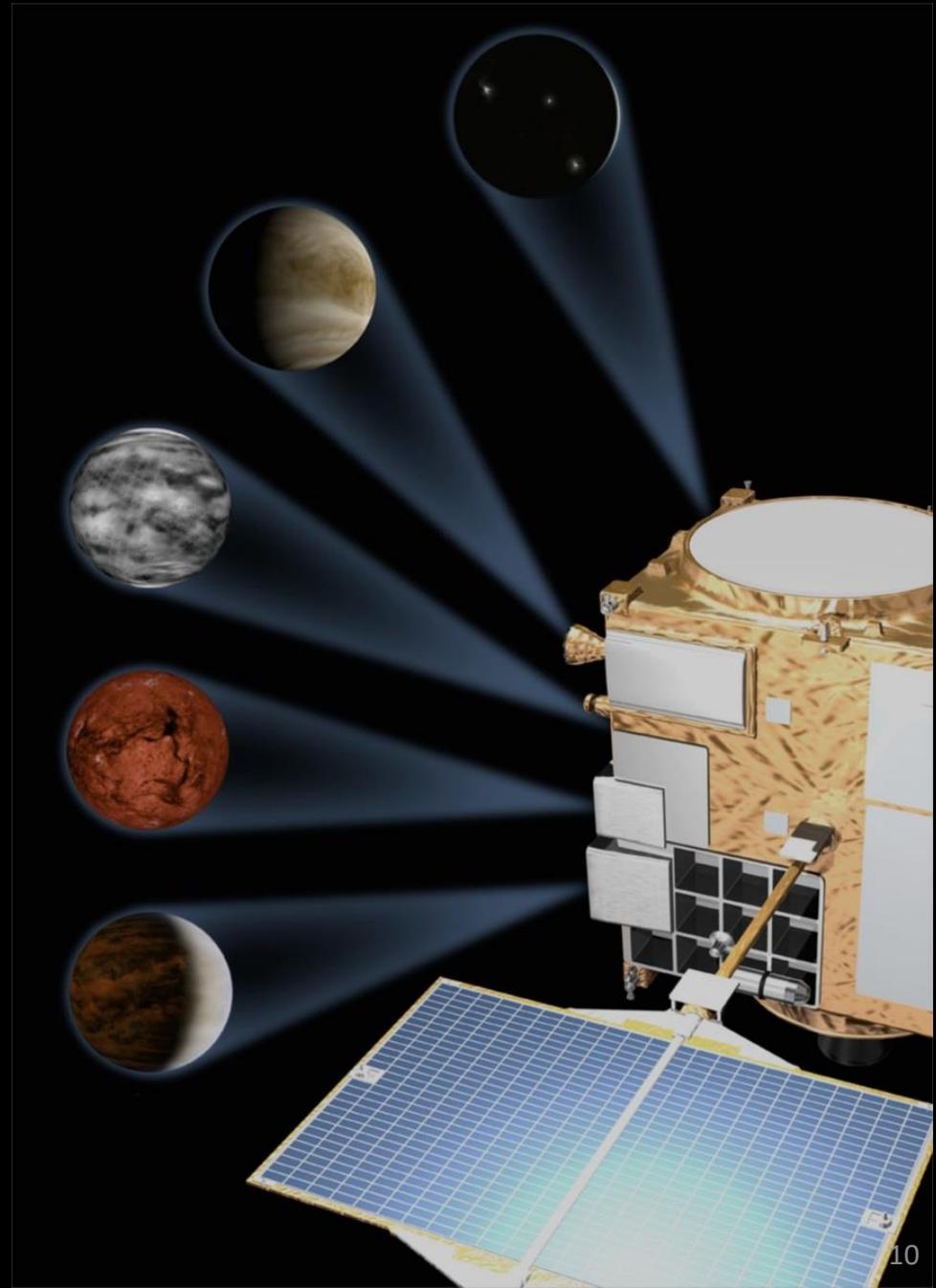
- 入射太陽光の~76%が雲層で反射される [Crisp and Titov, 1997].
- 大気・地表で吸収する太陽光エネルギーの~50%が (主に紫外未知吸収物質によって) 雲層 (>64 km) で吸収される [Tomasko et al., 1980].

金星における雲は、大気化学、大気運動、熱収支を考える上で重要な役割を果たしている。

金星探査機「あかつき」

金星周回軌道から雲の上層から下層まで透視する3次元的なリモートセンシングによって金星の気候のしくみに迫る

- スーパーローテーションはなぜ起こるのか
- 大気は上下, 南北方向にどう循環しているのか
- 金星全体を隙間なく覆う雲はどう作られるのか
- 雷は起こるのか
- 活火山はあるか



「あかつき」の科学機器

雷・大気光カメラ (LAC)



PLANET-C LAC

1 μmカメラ (IR1)



PLANET-C IR1

超高安定発信器 (USO)



PLANET-C USO

中間赤外カメラ (LIR)



PLANET-C LIR-S

紫外イメージャ (UVI)



PLANET-C UVI-S

2 μmカメラ (IR2)



PLANET-C IR2

「あかつき」の諸元

- 1.04 m × 1.45 m × 1.40 m
- 502 kg (内訳: バス機器56%, 燃料38%, 科学機器7%)

「あかつき」IR2が目指す科学

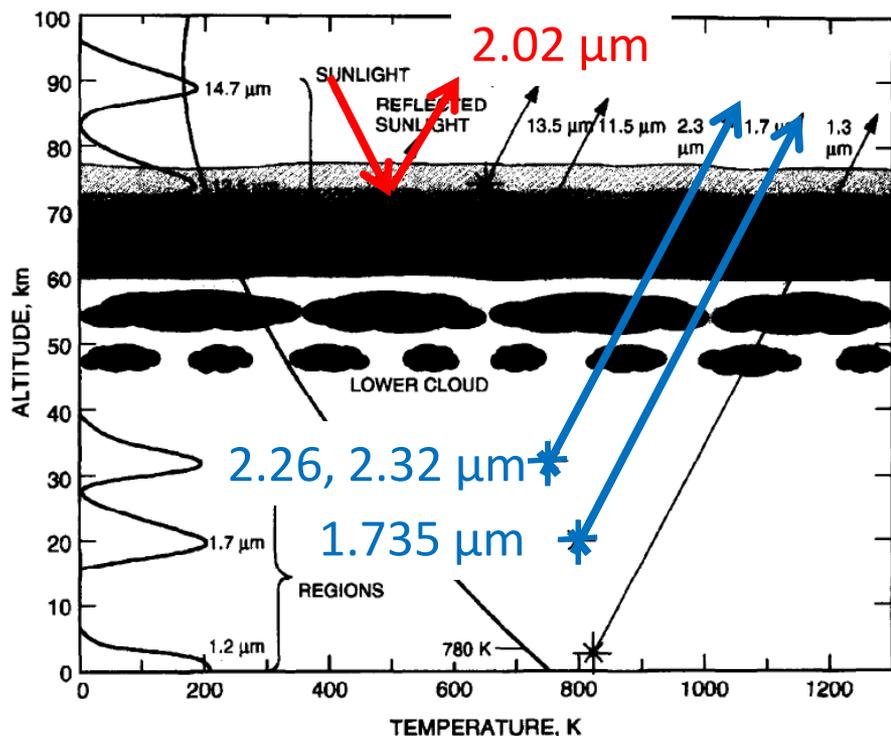


図. 観測波長と感度高度の関係 [Taylor, 1998].

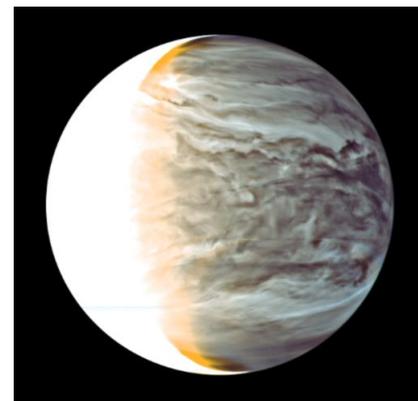


図. 夜面2波長 (1.735 μm と2.26 μm) を用いた金星下層雲の疑似画像.

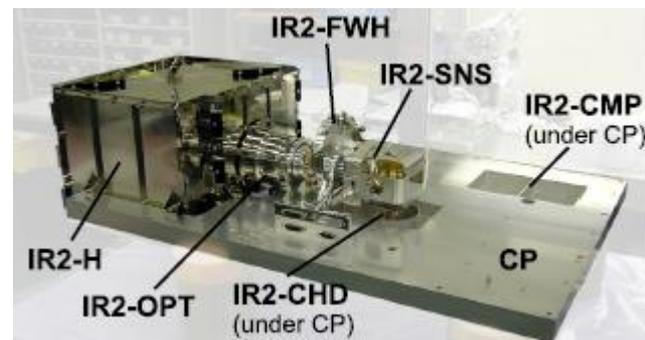
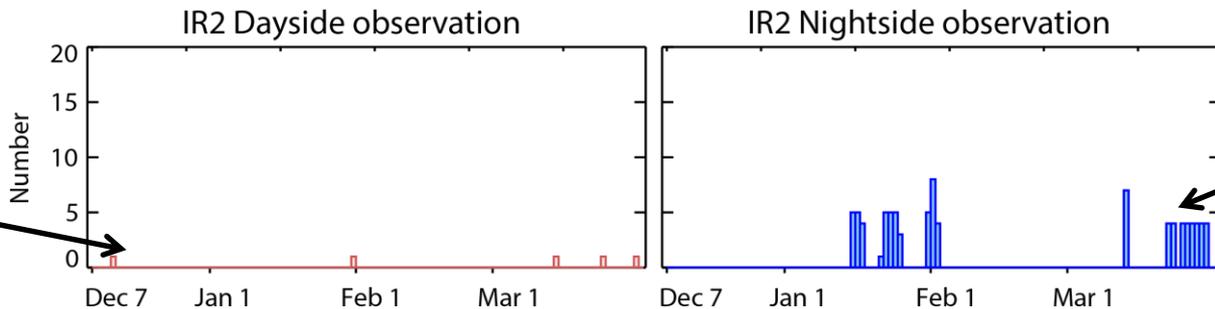


図. IR2の外観 [Satoh et al., 2016].

- **2.02 μm** : CO_2 吸収帯における反射太陽光
- **雲頂高度**の可視化, 金星**昼面のみ**観測可
- **1.735, 2.26, 2.32 μm** : 大気の窓, 雲層下から射出される熱放射
- **雲の光学的厚さ**, **CO分布**の可視化, 金星**夜面のみ**観測可

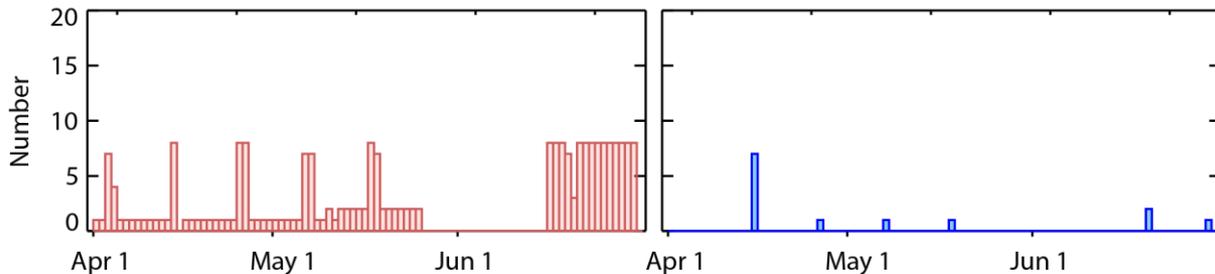
「あかつき」IR2の観測記録

周回軌道
後初観測

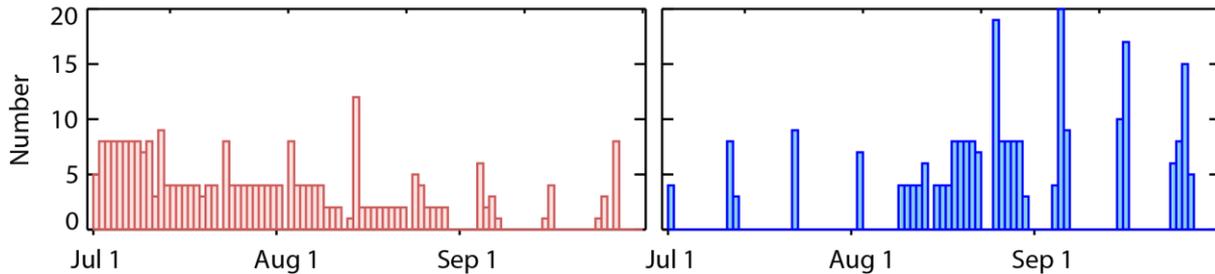


定常観測
開始

昼面観測
シーズン
(4月-7月)



夜面観測
シーズン
(8月-10月)



IR-AE
異常停止
(12月9日)

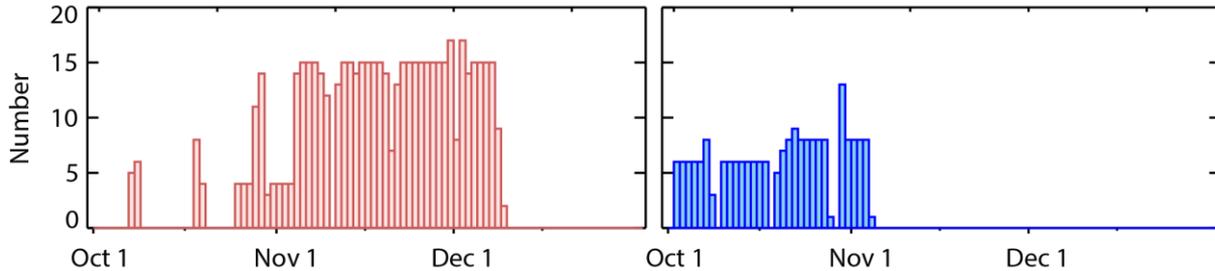


図. 2015-2016年のIR2観測記録.

先行研究に学ぶ「あかつき」データ解析へのヒント

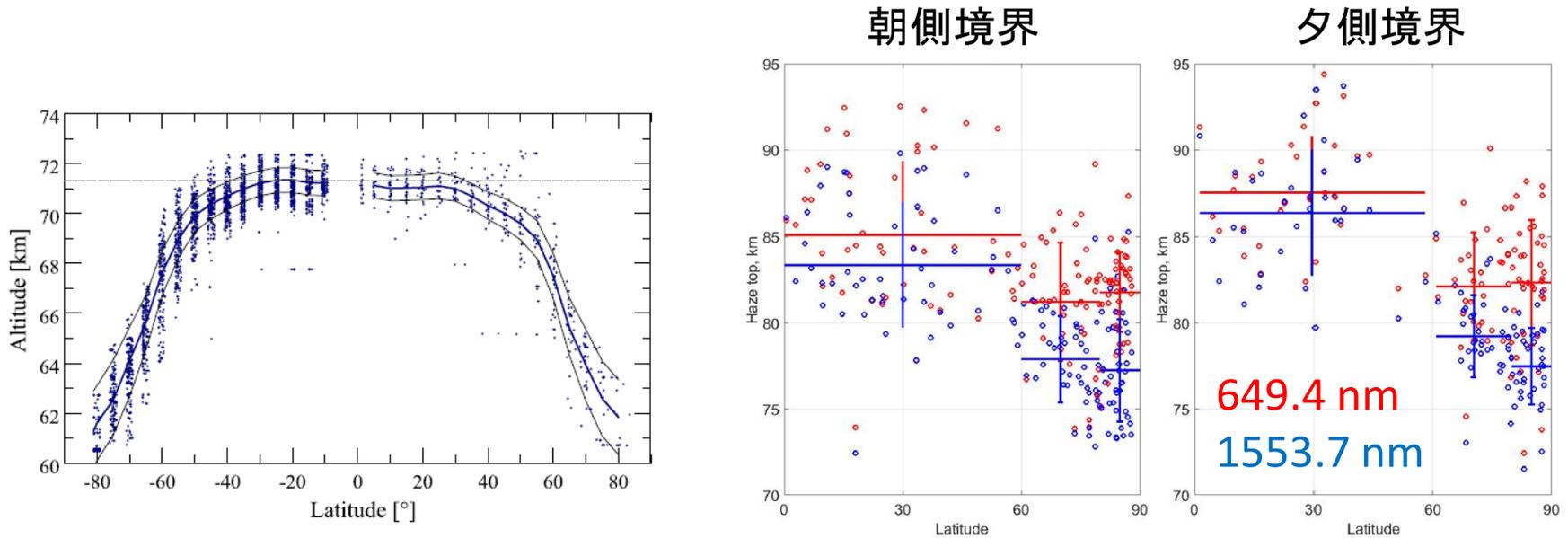


図. (左) VEX/VIRTIS熱放射データに基づく雲頂高度の緯度分布 [Haus et al., 2014],
(右) VEX/SOIR太陽掩蔽データに基づく雲頂高度の緯度分布 [Luginin et al., 2016].

❑ 欧州金星探査機Venus Express

- 赤道域における平均雲頂高度は**ほぼ一定** [Ignatiev et al., 2009; Haus et al., 2014]
- 平均雲頂高度の**顕著なローカルタイム依存性はない** [Luginin et al., 2016]
- 平均的な雲モデル (ベースモデル) は, **観測された赤道域平均の放射輝度の太陽位相角依存性 (位相曲線) を一様の雲頂高度で再現する必要がある.**

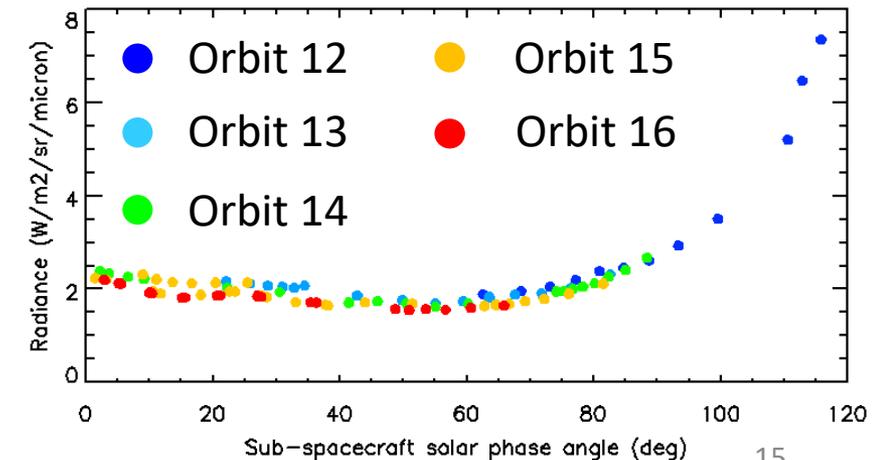
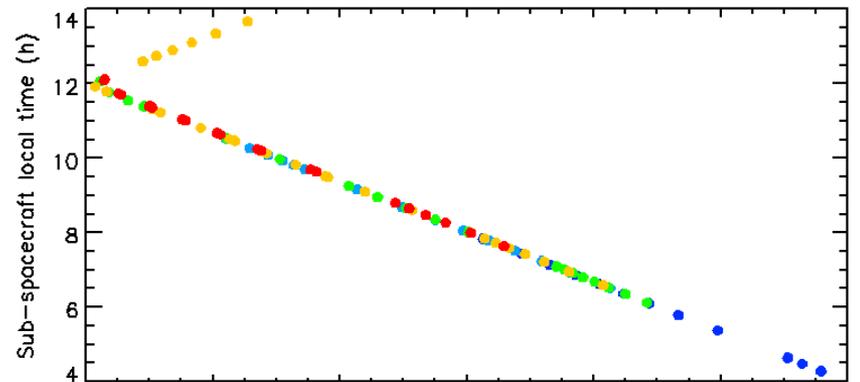
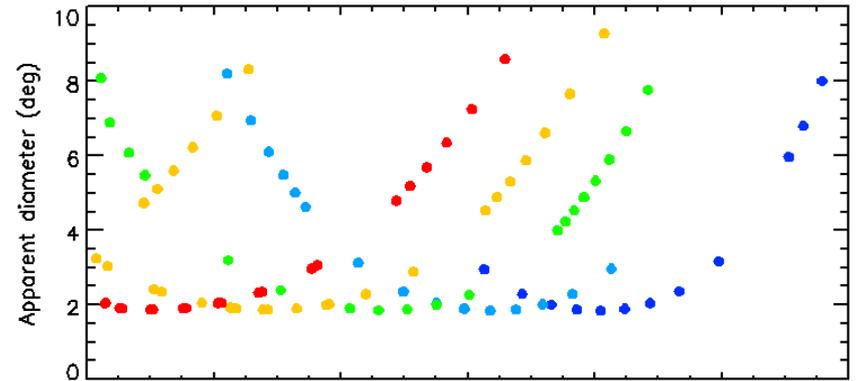
観測データ

□ 使用したデータ

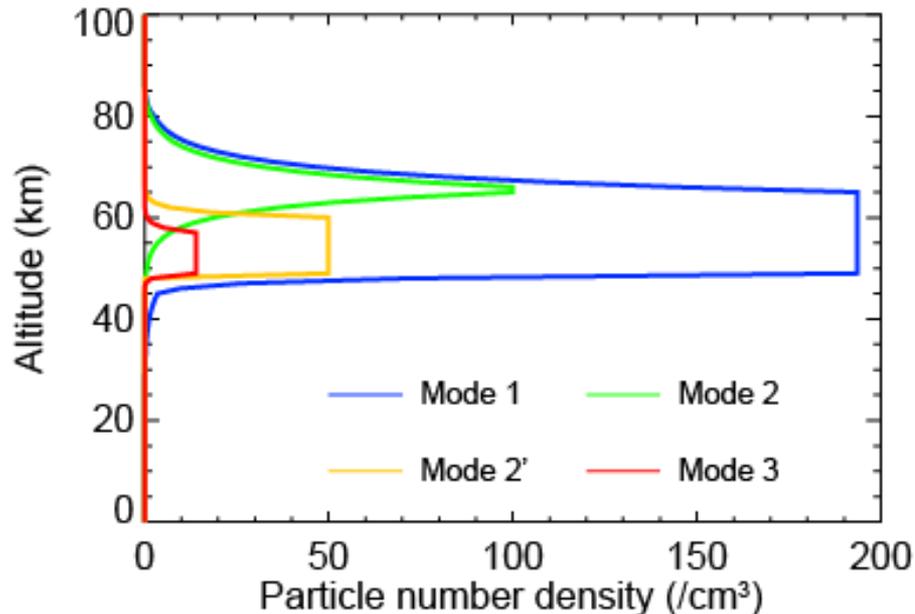
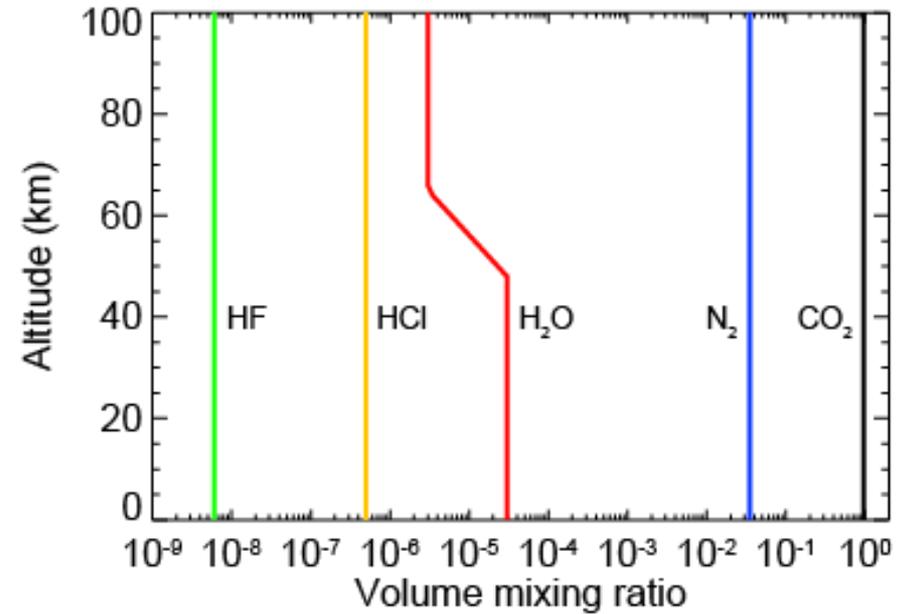
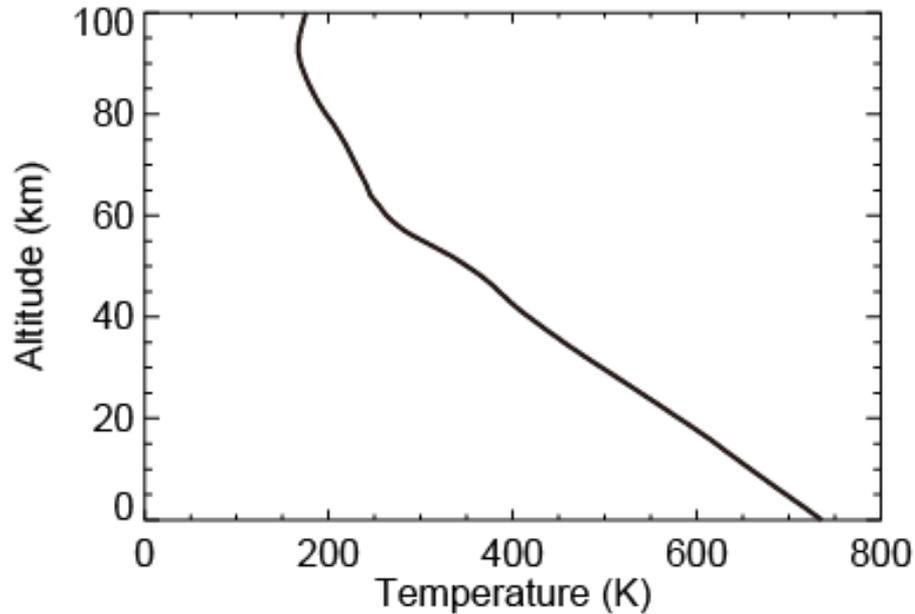
- 2.02 μm で取得した93画像
(軌道番号12-16, 2016/4/4-5/25)
- 公開データ (VCO-V-IR2-3-CDR-V1.0)
- デコンボリューションと低周波フラット成分を追加処理
- 各画像について, 下記条件を満たすピクセルの放射輝度を平均

- ✓ $\mu \geq 0.1$
- ✓ $\mu_0 \geq 0.1$
- ✓ $-30^\circ \leq \text{latitude} \leq 30^\circ$

図. 衛星直下点における太陽位相角に対する
(上) 視直径
(中) 衛星直下点におけるローカルタイム
(下) 赤道域平均の放射輝度



放射伝達モデル: 入力パラメータ



□ 入力パラメータ

- 図. (左上) VIRAModelより赤道域の温度プロファイル [Seiff et al., 1985]
(右上) 2.02 μm 解析のために考慮した大気分子の高度プロファイル [Marcq et al., 2005; Haus et al., 2010]
(左下) 雲モデル [Haus et al., 2015].

放射伝達モデル: 入力パラメータ

表. 大気分子の吸収断面積を計算するためのパラメータ
(主にHaus et al. [2013]に基づく).

Molecules	Database	Line shape	Chi factor	Cutoff
H ₂ O	HITEMP2010	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
CO ₂	HITEMP2010 (dayside) HITEMP-Venus (nightside)	Voigt	Tonkov et al. (1986)	125 cm ⁻¹
CO	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
SO ₂	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
HF	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
HCl	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
OCS	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹
N ₂	HITRAN2014	Voigt	1.0	125 cm ⁻¹

表. IR2の観測波長におけるCO₂連続吸収係数
(2.02 μm 以外はHaus et al. [2013]に基づく)

Spectral channel	1.735	2.02	2.26 and 2.32
Coefficient coefficients [cm ⁻¹ amagat ⁻²]	4.1x10 ⁻⁹	0.0	43x10 ⁻⁹

HITEMPデータベースの比較

HITEMP比較: CO₂

- 比較対象: 02_1000k, private, HITEMP2010
- 10⁻³⁵ (cm⁻¹/molecule cm⁻²) よりも弱い線吸収データは使用しない。

表. 各データベースのCO₂線吸収

	02_1000k	private	HITEMP2010
IR1波数域 (9,000-12,000 cm ⁻¹)	167	50,769	187,434
IR2波数域 (4,000-6000 cm ⁻¹)	26,756	390,185	402,507
LIR波数域 (600-1600 cm ⁻¹)	34,952	486,249	593,978

- 出版の順番通り, どの波数域でも**HITEMP2010が最も多くの線吸収データを有している**. しかし, ...

HITEMPデータベースの比較

IR2

02_1000k, private, HITEMP2010

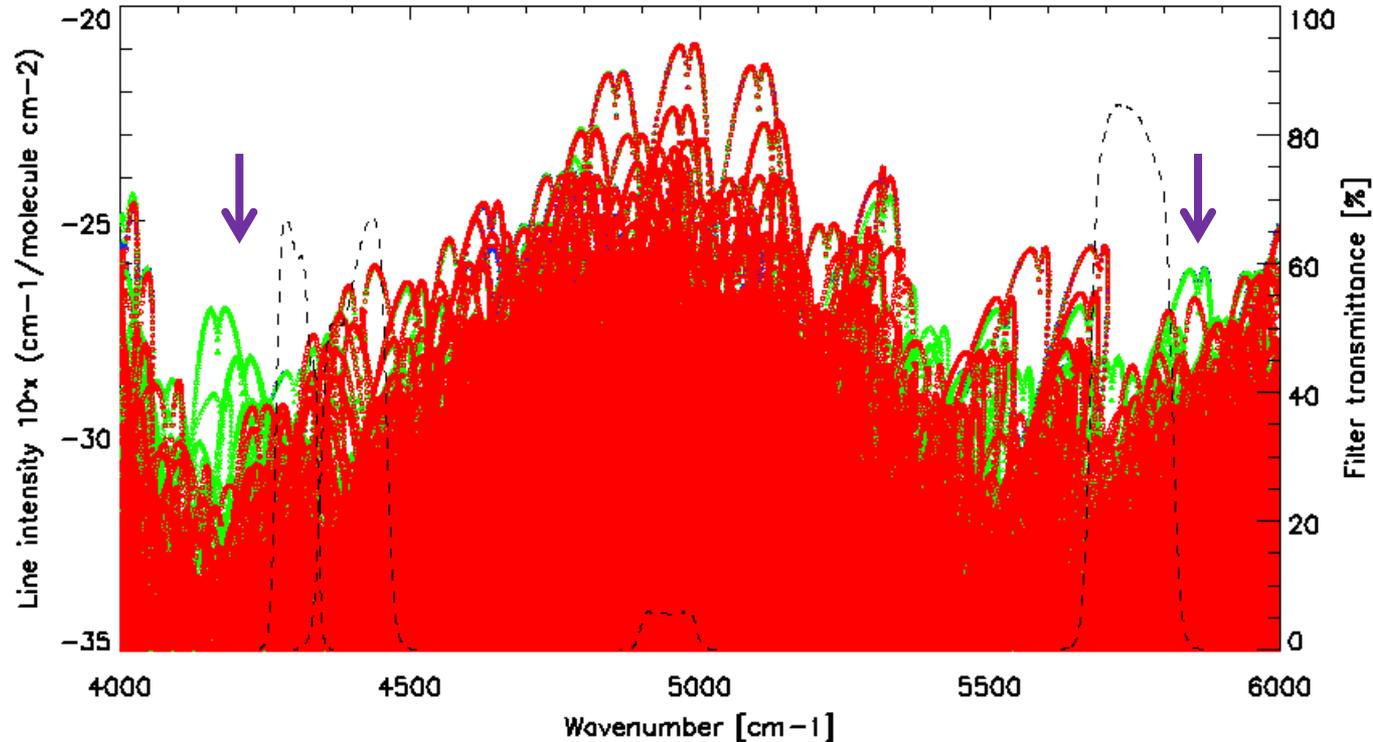


図. IR2波長帯におけるCO₂線吸収

- Private: HITEMP2010にない比較的強い線吸収データが1.735, 2.320 μm フィルター付近に存在する.

HITEMPデータベースの比較

□ IR2: 1.735 μm

相対誤差: -33.7%

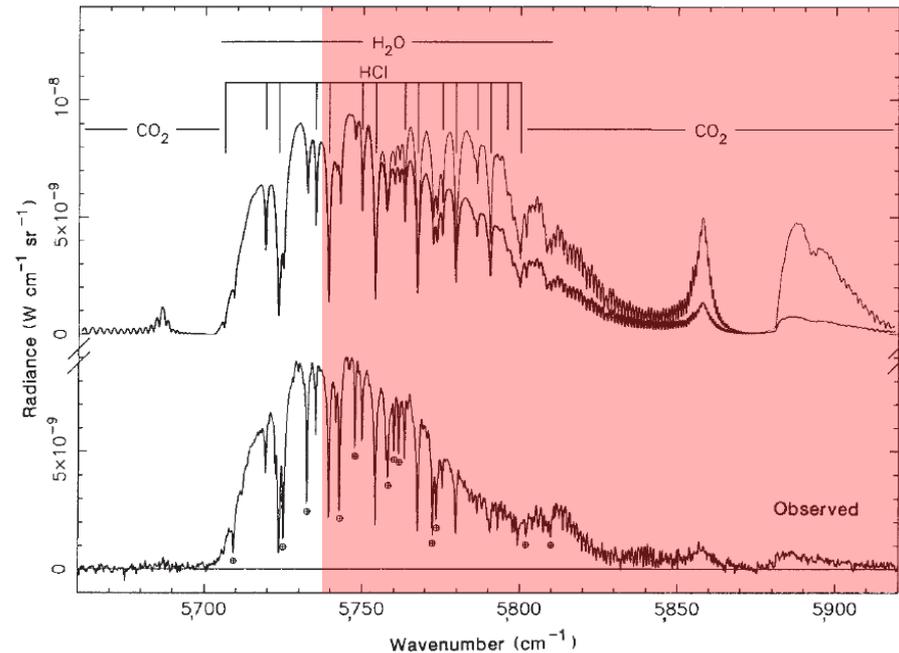
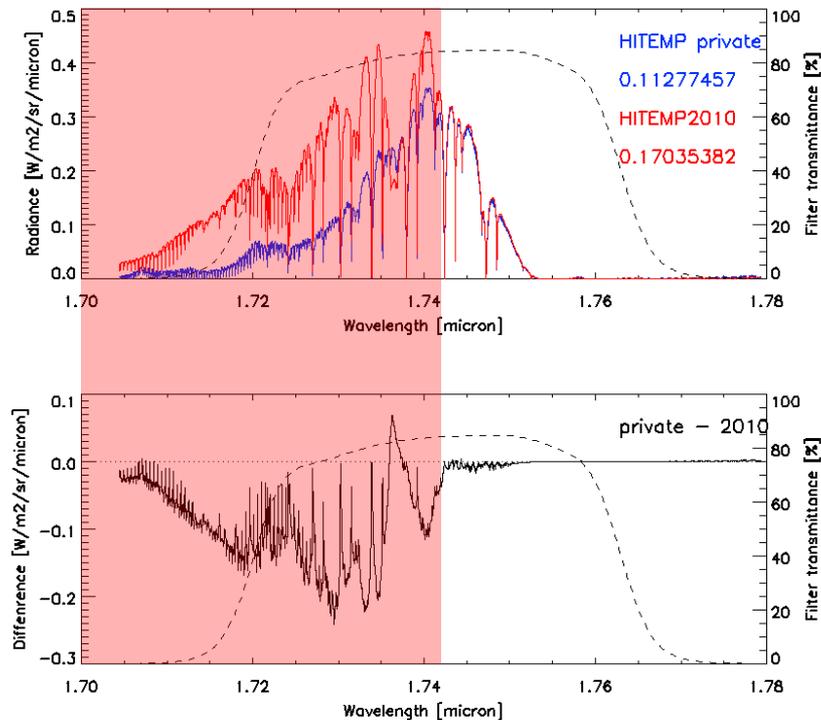


図. (左) データベースの違いによる計算スペクトルの違い
(右) 地上観測スペクトル (Bézard et al., 1990)

大気窓の短波長側が全く合わない。

➤ 観測スペクトルを見る限り, HITEMP2010は全く合わない印象。

Haus雲モデルを使用した場合の計算スペクトル

表. 4種類のモード粒子のモード半径と分散 [Pollack et al., 1993]
(log-normalサイズ分布を仮定).

	Mode 1	Mode 2	Mode 2'	Mode 3
\bar{r} (μm)	0.30	1.00	1.40	3.65
σ_{\log}	1.56	1.29	1.23	1.28

硫酸雲の複素屈折率
($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}=75\%:25\%$)
[Palmer and Williams, 1975]

□ Haus雲モデルを使用した場合の計算スペクトル例

- LBL計算
- Adding-doubling method

本研究での雲頂高度の定義:
2.02 μm で大気上端から雲の光学的厚さが1となる高度

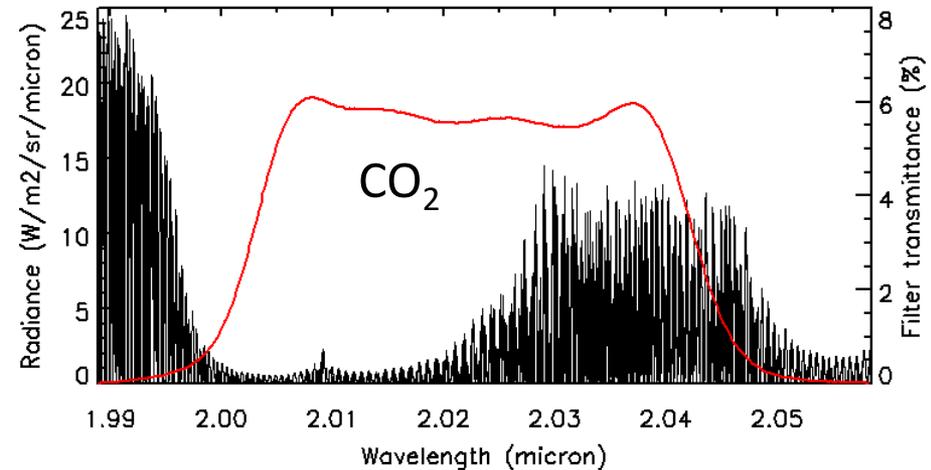


図. IR2昼面データのための計算スペクトル例
(波長間隔: 0.005 cm^{-1} ,
平均の太陽金星距離を使用).

解析方法

1. Mode 1とMode 2の数密度分布 $N(z)$ を簡素化

- $N_{mode1}(z) = \alpha N_c \exp[-(z - 66)/H]$
- $N_{mode2}(z) = N_c \exp[-(z - 66)/H]$
- $N_c = 1 / \left\{ [\alpha \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2] \int_{z_c}^{100} \exp[-(z - 66)/H] dz \right\}$

2. 8次元パラメータ空間 $(\alpha, r_1, r_2, H, z_c, \mu, \mu_0, \Delta\phi)$ の各組合せに対して、フィルター平均輝度を計算し**参照テーブルを作成**.
3. 5次元パラメータ空間 $(\alpha, r_1, r_2, H, z_c)$ の各組合せに対して、**各画像の疑似放射輝度マップ**を、手順2で得たテーブルと各ピクセルの観測ジオメトリ $(\mu, \mu_0, \Delta\phi)$ を基に内挿により求める.
4. **4次元パラメータ空間 (α, r_1, r_2, H) の各組合せに対して**、観測で得られた赤道域の位相曲線を最も再現する z_c を最小二乗法により求め、 **χ^2 の最小値**を計算.

$$\chi^2 = \sum_i \left[\frac{\overline{I_{obs}^i} - \overline{I_{sim}^i}}{\overline{\sigma_{obs}^i}} \right]^2$$

$$\overline{\sigma_{obs}} = 1$$

(見積もり中のため)

α : Mode1とMode2の混合比, N_c : 雲頂高度 z_c となるための数密度, H : 雲のスケールハイ
ト, $\overline{\sigma}_1, \overline{\sigma}_2$: Mode 1とMode 2のフィルター平均消散断面積, r_1, r_2 : Mode 1とMode 2のモー
ド半径

解析方法

□ 任意の観測ジオメトリ($\mu, \mu_0, \Delta\phi$)における放射輝度を参照テーブルから求める際の精度検証

- 参照テーブルの計算範囲

$$0.067 \leq \mu \leq 1$$

$$0.067 \leq \mu_0 \leq 1$$

$$0^\circ \leq \Delta\phi \leq 180^\circ$$

- 合計10,164 ($22 \times 22 \times 21$) 点

- スプライン補間

- ✓ 精度検証

- ランダムに発生させた1,000点の疑似観測ジオメトリに対して,

A) 計算間隔: 0.005 cm^{-1}

ジオメトリ: 直接

B) 計算間隔: 0.005 cm^{-1}

ジオメトリ: 内挿

C) 計算間隔: 0.1 cm^{-1}

ジオメトリ: 内挿

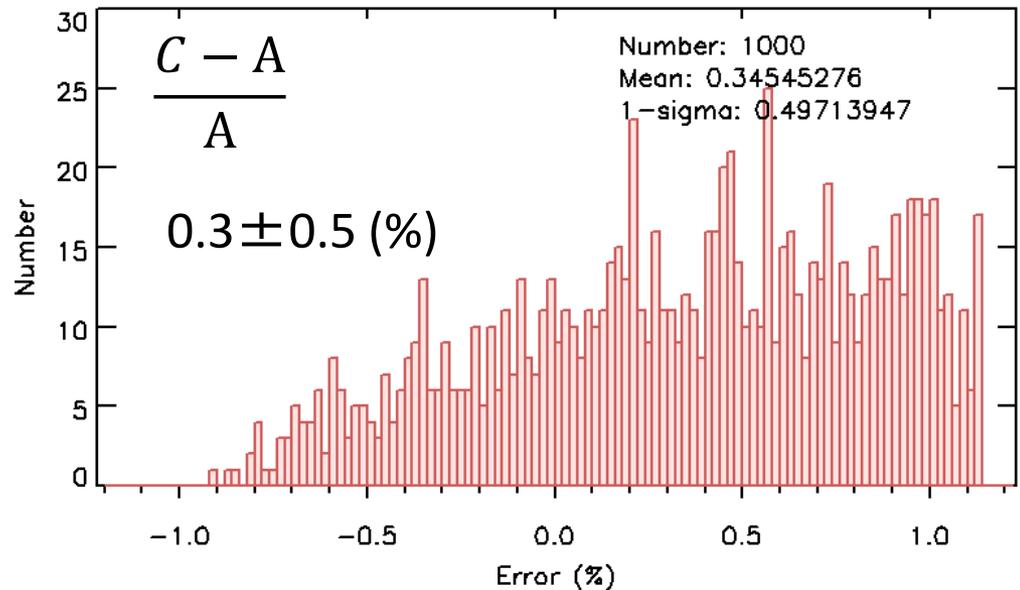
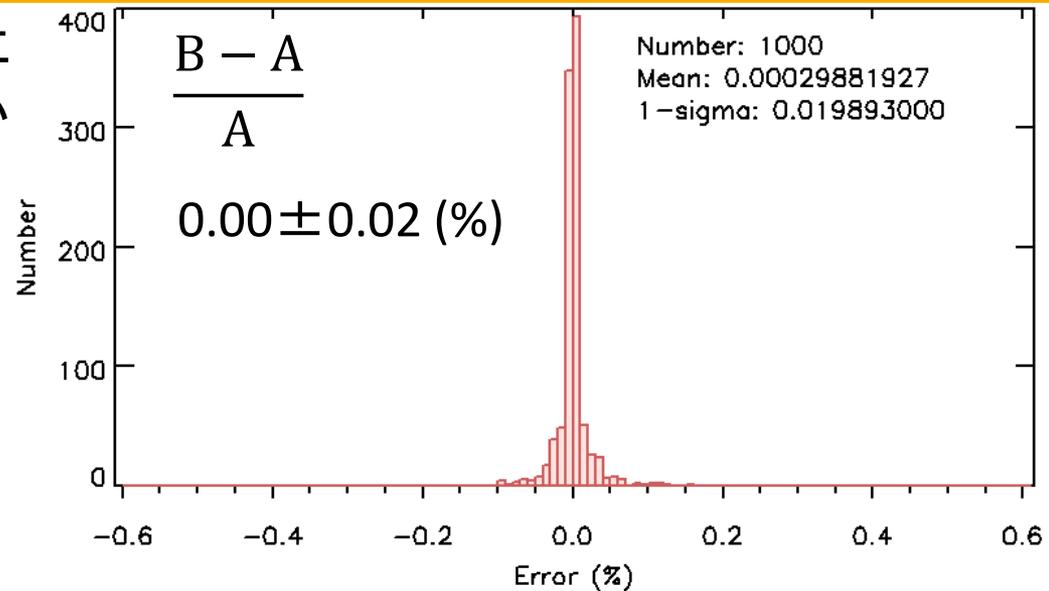


図. 参照テーブルの内挿に関する精度検証.

結果

- 各パラメータの感度を調べるため、9種類のシナリオについて計算した。

	Mode 1と Mode 2の 混合比: α^*	Mode 1: r_1 (μm)*, σ_1^*	ベスト フィット χ^2	Mode2: r_2 (μm)	スケール ハイト: H (km)	雲頂高度: z_c (km)
Case1	0	-	0.014935	1.20	6.0	70.29
Case2 [#]	1.45	(0.30, 1.56)	0.014937	1.25	6.5	70.09
Case3	5	(0.30, 1.56)	0.015270	1.30	6.5	69.82
Case4	50	(0.30, 1.56)	0.018324	1.45	6.5	68.30
Case5	500	(0.30, 1.56)	0.035290	1.50	5.0	67.41
Case6	1.45	(0.085, 1.45)	0.014935	1.20	6.0	70.29
Case7	5	(0.085, 1.45)	0.014933	1.20	6.0	70.29
Case8	50	(0.085, 1.45)	0.014934	1.20	6.0	70.28
Case9	500	(0.085, 1.45)	0.014823	1.20	6.5	70.08

* 固定値.

(0.30, 1.56): Pollack et al. [1993], (0.085, 1.45): Luginin et al. [2016]

Case2がHaus雲モデルに最も近いモデル.

結果: Case2 (標準モデル)

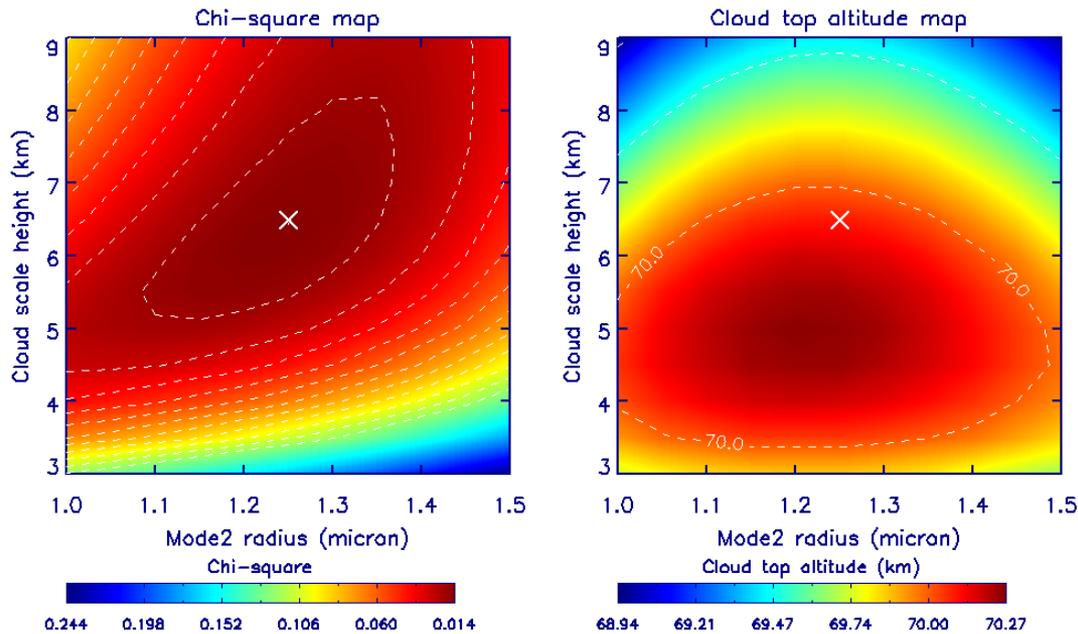
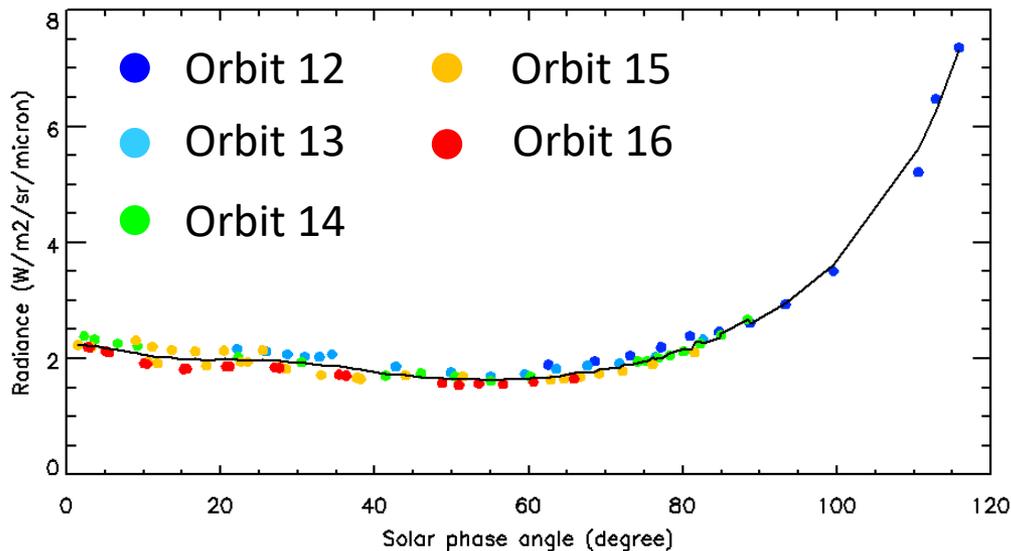


図. (上) r_2 と H に対する χ^2 と雲頂高度 z_c のマップ
(下) 観測とベストフィットモデルの位相曲線の比較.



□ ベストフィットパラメータ

- Mode 2のモード半径
 $r_2 = 1.25 \mu\text{m}$
- 雲のスケールハイト
 $H = 6.5 \text{ km}$
- 雲頂高度
 $z_c = 70.09 \text{ km}$

➤ **ベストフィットモデルは観測の位相曲線をよく再現している.**

結果: Case2 (標準モデル)

□ 感度チェック

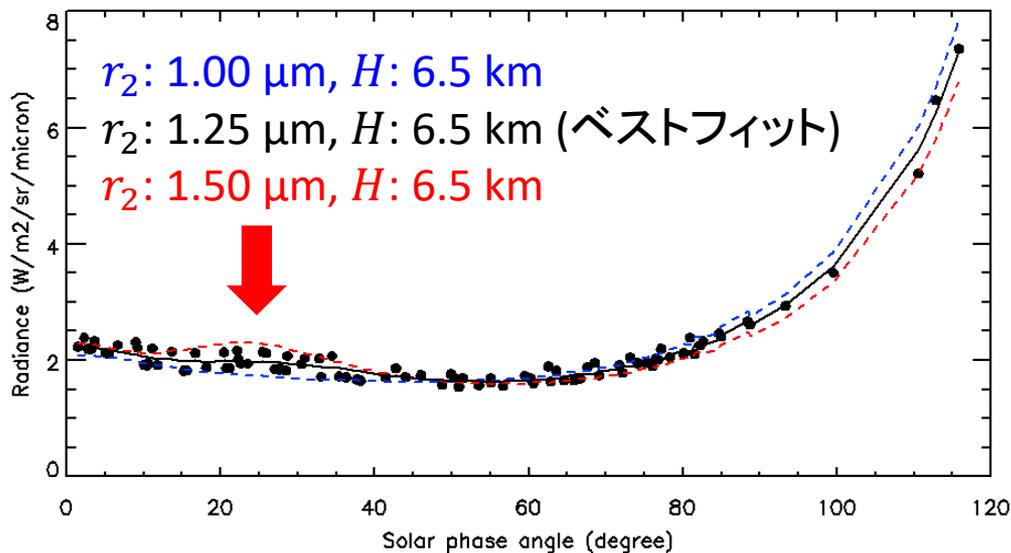
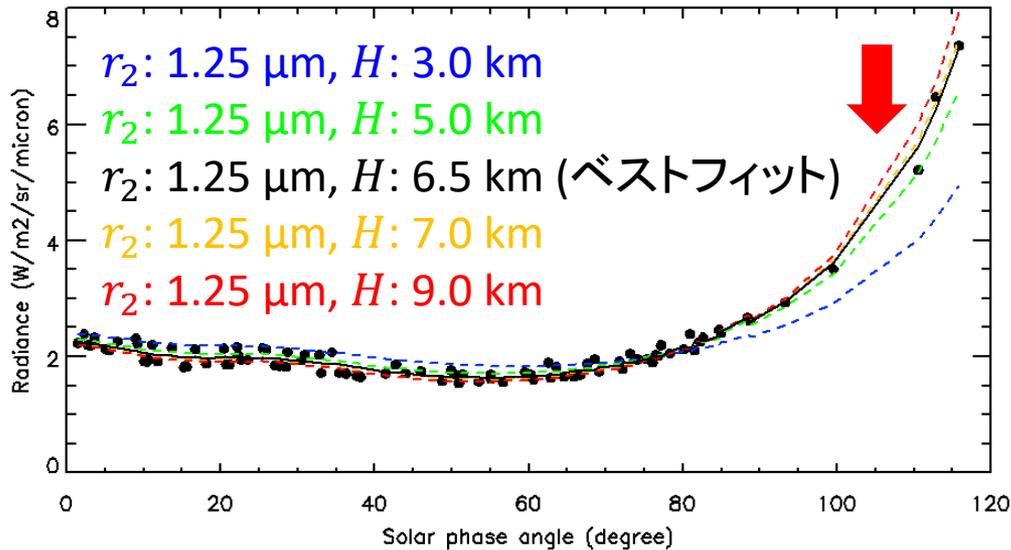


図. (上) 雲のスケールハイトに対する位相曲線変化
(下) Mode 2のモード半径に対する位相曲線変化.

- 雲のスケールハイト H
 - 高高度情報を含む中～高位相角 ($> \sim 80^\circ$) データに感度あり
 - 上層雲はかなり広がった層構造をもつ.
- Mode 2のモード粒子 r_2
 - 位相角 ($10-40^\circ$) の位相曲線の形に感度あり

結果: Mode 1 (Pollack) の場合

Mode 1 (Pollack) を使った場合の Mode 1 と Mode 2 の混合比依存性

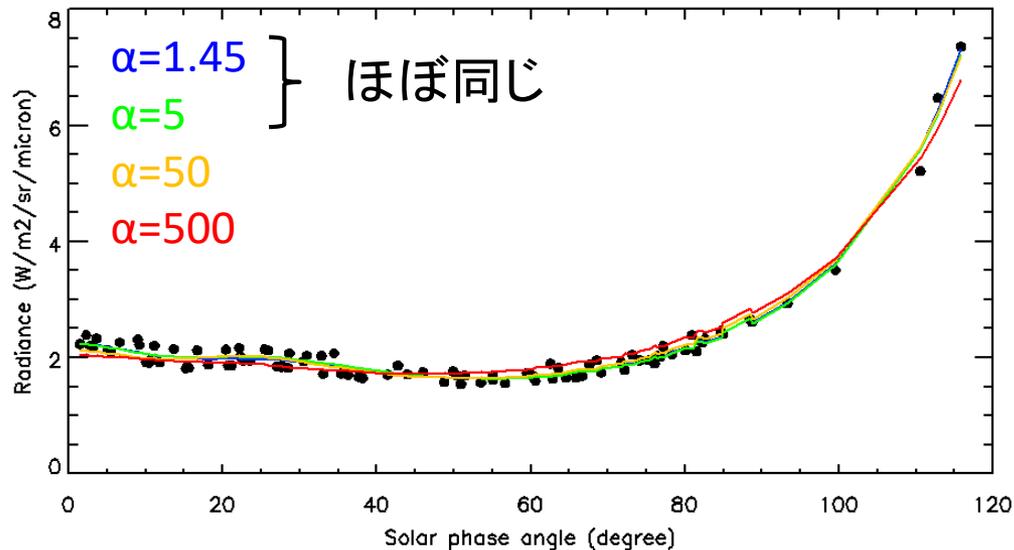
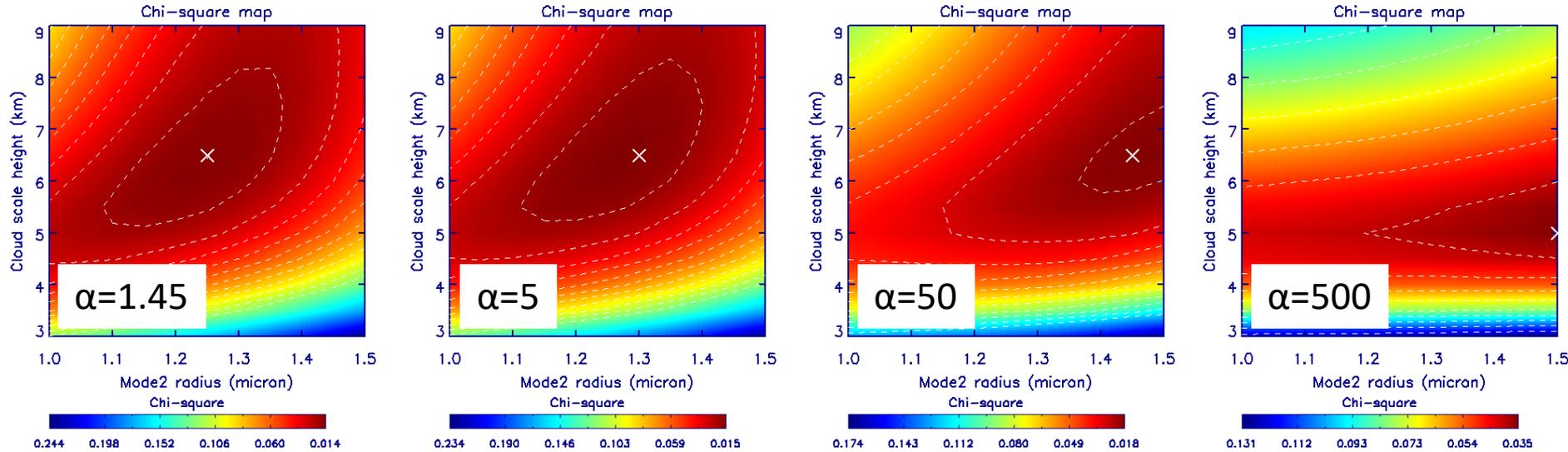


図. (上) r_2 と H に対する χ^2 マップの α 依存性
 (下) 観測とベストフィットモデルの位相曲線の比較.

Mode 1 (Pollack) を増やすと、フィットは悪くなる

➤ α が小さい ($\alpha \leq 5$) 場合は、IR2 データのみから混合比を決めるのは不可能.

結果: Mode 1 (Luginin) の場合

Mode 1 (Luginin) を使った場合の Mode 1 と Mode 2 の混合比依存性

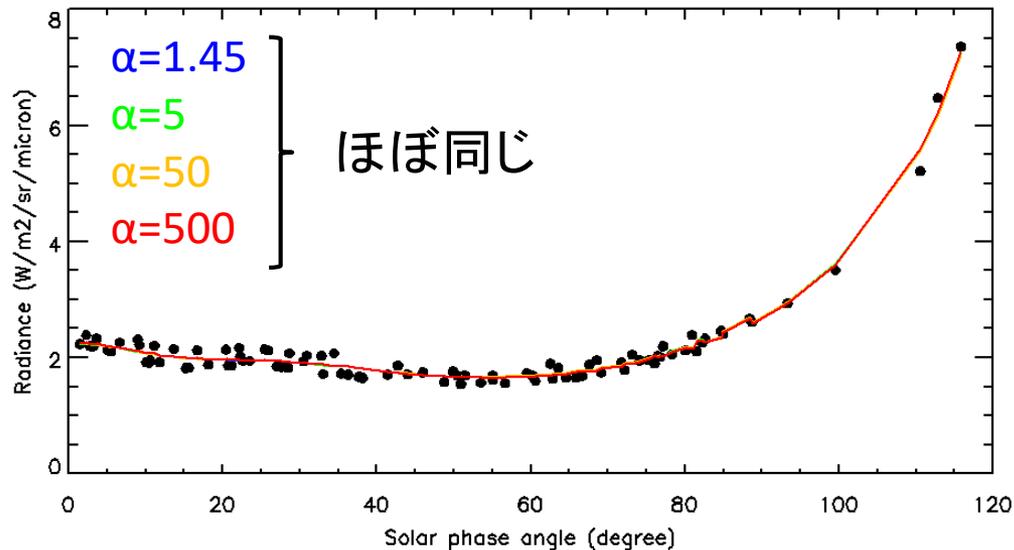
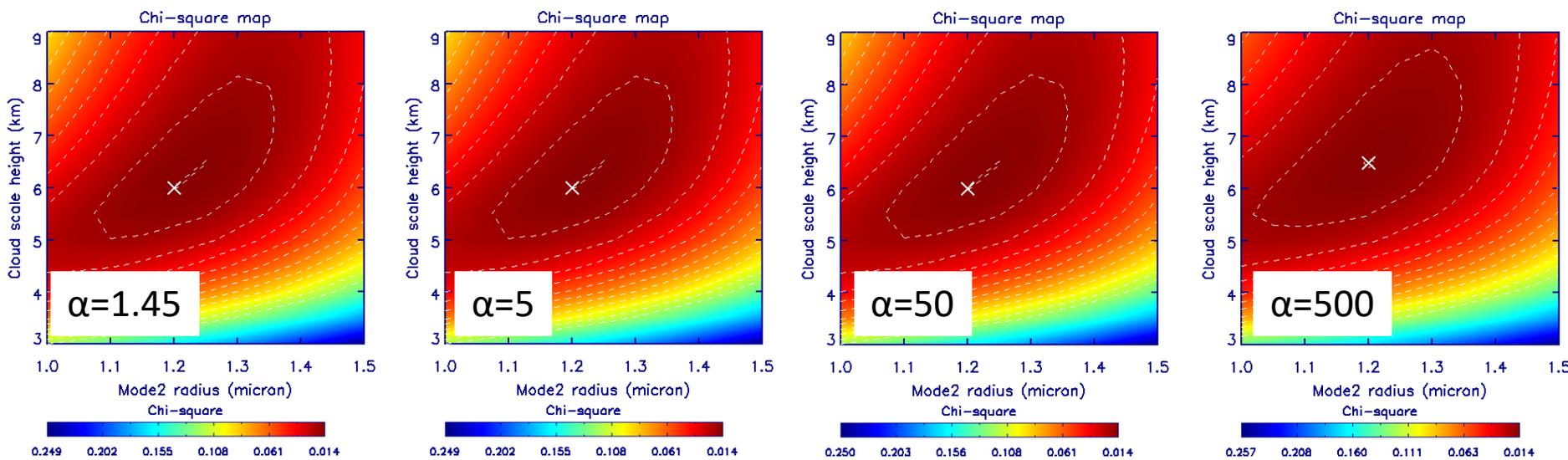


図. (上) r_2 と H に対する χ^2 マップの α 依存性
 (下) 観測とベストフィットモデルの位相曲線の比較.

Mode 1 (Luginin) をかなり増やしてもフィットは変わらない。
 ➤ IR2データのみから混合比を決めるのは不可能.

議論, 先行研究との比較

- Mode 1のモード半径とMode 1とMode 2の混合比への感度
 - 消散断面積 ($2 \mu\text{m}$) ($\text{m}^2/\text{particle}$): Mode 2 (i.e., $r_2=1.0 \mu\text{m}$, $\sigma_2=1.29$) = 1.0×10^{-11}
Mode 1 (Pollack) = 2.7×10^{-13} , Mode 1 (Luginin) = 2.3×10^{-16}
 - Mode 1 (Luginin): Mode 2に対して**十分無視できるレベル**
 - α が小さい ($\alpha \leq 5$) 場合は, IR2昼面データで**Mode 1の光学特性は制約できない.**
- Mode 2のモード半径, 雲のスケールハイト, 雲頂高度
 - Rossi et al. [2015]: VEX/SPICAV, 近赤外昼面偏光分光 $\rightarrow r_2 \sim 0.85 \mu\text{m}$
 - Luginin et al. [2016]: VEX/SOIR, 可視近赤外太陽掩蔽分光 $\rightarrow r_2 = 0.66 \mu\text{m}$
 - Lee et al. [2012] VEX/VIRTIS+VeRa, 近赤外夜面分光 $\rightarrow H = 2.2\text{-}5.4 \text{ km}$
 - Luginin et al. [2016]: VEX/SOIR, 可視近赤外太陽掩蔽分光 $\rightarrow H = 3\text{-}4 \text{ km}$
 - ✓ **典型的な (既知として使われてきた) Mode 2のモード半径 ($r_2 = 1 \mu\text{m}$) を使うと, スケールハイトは5 kmになる.**
 - Cottini et al. [2012]: VEX/VIRTIS-H, 近赤外昼面分光 $\rightarrow z_c = 69.5 \text{ km}$ at $2.5 \mu\text{m}$
 - Haus et al. [2014]: VEX/VIRTIS, 近赤外夜面分光 $\rightarrow z_c = 71 \text{ km}$ at $1 \mu\text{m}$
 - Fedrova et al. [2016]: VEX/SPICAV, 近赤外昼面分光 $\rightarrow z_c = 70.2 \text{ km}$ at $1.48 \mu\text{m}$
 - ✓ **導出した雲頂高度 ($z_c \sim 70 \text{ km}$) は整合的, Mode 1に対するモデル依存度も低い.**

まとめと今後の課題

□ まとめ

- 各画像に対して雲頂高度マップを求めるため、「あかつき」IR2の $2.02\ \mu\text{m}$ の昼面画像(2016年4月–5月)を放射伝達計算を基に解析している。
- 第一段階として、赤道域の平均放射輝度の位相曲線を再現するベースとなる雲モデルを導出した。
- 標準モデル (Case2) の場合、 $r_2=1.25\ \mu\text{m}$, $H=6.5\ \text{km}$, $z_c=70.09\ \text{km}$ の組み合わせでベストフィットが得られた。雲頂高度は先行研究と整合的だが、Mode 2のモード半径や雲のスケールハイトは先行研究よりも大きい結果となった。Mode 1の光学特性や混合比は、IR2昼面データ単独では制約できないことが分かった。

□ 今後の課題

- 観測誤差 (バイアス, ランダム) の見積もり
- 解の許容範囲の決定に重要
- 上記ベースモデルを基に、雲の光学的厚さ (= 雲頂高度) のみを調節することで、各画像の雲頂高度マップを作成する
- IR2 (雲頂高度) と UVI (未知吸収物質) の模様の比較
- その他のパラメータ (温度プロファイル) に対する雲モデルの感度検証